

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura



Tesis Doctoral

**Metodología Complementaria a los Balances
Energéticos para el Abordaje de Políticas de
Eficiencia Energética en Usos Finales
Casos de Calefacción y Refrigeración en Argentina**

Roque Gustavo Stagnitta

Director: Emanuela Colombo
Co-Director: Rita Abalone

Miembros del Jurado: Carina Guzowski
Francisco Lallana
Roberto Laura

*Tesis presentada en la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, en
cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de*

Doctor en Ingeniería

Noviembre de 2020

Certifico que el trabajo incluido en esta tesis es el resultado de tareas de investigación originales y que no ha sido presentado para optar a un título de postgrado en ninguna otra Universidad o Institución.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'R. Stagnitta', is written over a light blue rectangular background.

Roque Gustavo Stagnitta

Resumen

Desde las últimas décadas, los sistemas energéticos se analizan bajo el paradigma del consumo eficiente y uso racional. Los balances de energía tradicionales han sido históricamente concebidos desde la perspectiva de la oferta, sin proporcionar información completa sobre cómo son los procesos de consumo final de dicha energía hasta convertirse en un servicio útil o prestación. Por otro lado, al ser balances de Primer Principio de la Termodinámica, no permiten observar la degradación de los flujos energéticos en cada etapa de transformación, en especial, en la etapa de uso final hasta convertirse en una prestación deseada. Además, al no incluir dentro del análisis los intercambios de bienes y servicios entre distintos sectores de la economía, y la energía embebida en ellos, no reflejan los efectos globales de variaciones en la demanda final de energía debido a intervenciones de eficiencia energética que necesiten de bienes o servicios para sustanciarse.

Se propone en el presente trabajo una metodología complementaria para el abordaje de políticas de eficiencia energética en usos finales, que posibilite: (1) cuantificar la prestación que se brinda a partir del uso de la energía; (2) observar el nivel de acoplamiento entre la exigencia de dicha prestación y la energía secundaria que se utiliza para proporcionarla; y, por último, (3) observar el impacto global de intervenciones de eficiencia energética en el uso final de la energía utilizando como herramienta el Análisis Input – Output.

La metodología propuesta se desarrolló para los usos de calefacción y refrigeración de ambientes. Como caso de aplicación, se analizaron cinco localidades de la República Argentina con distintos climas y contextos socioeconómicos, evaluándose luego el impacto global en el consumo de energía primaria debido a intervenciones en eficiencia energética considerando tres escenarios diferentes. Los resultados obtenidos de la aplicación demuestran, en primer lugar, que en las ciudades analizadas el confort en el uso de calefacción es aproximadamente el definido mientras que en el caso de refrigeración el servicio se brinda en cantidades excesivas; que tanto en calefacción como en refrigeración se utilizan energías secundarias de mucha calidad en relación a la exigencia de los servicios que se quieren brindar; y finalmente, se concluye que la sustitución de equipos activos de mejor eficiencia ocasiona un menor ahorro de energía secundaria respecto de la mejora en la aislación de la envolvente de viviendas, pero presenta un mayor ahorro de energía primaria si se contabiliza la energía incorporada en los bienes y servicios involucrados en las intervenciones.

Abstract

In the last decades, energy systems have been analyzed under efficient consumption and rational use paradigm. Country energy balances have been historically conceived addressing the energy chain based on a supply-side perspective, without providing comprehensive information about how energy is converted to become final useful services or benefits. On the other hand, being balances of the First Principle of Thermodynamics, they do not show the energy flows degradation in each transformation stage, especially in the final use stage until becoming a useful service. Furthermore, by not considering goods and services exchange between different consumption sectors, and their embodied energy, they do not reflect the global impacts of variations in final energy demand due to final use energy efficiency interventions.

This thesis proposes an approach for assessing the comprehensive impact of efficiency policies in final energy uses, capable of (1) quantifying final useful services; (2) reflecting the coupling degree between energy quality and requirements; and (3) accounting for the global impact due to end use efficiency interventions using the Input-Output Analysis.

The proposed methodology was applied for assessing efficiency policies in Argentina, focusing on residential space heating and cooling demand in five of its major cities with different climates and socio-economic contexts. Primary energy requirements of heating and cooling services were evaluated before and after different efficiency improvements policies, considering both the direct and indirect effects of the prospected policies. It is found out that, for the analyzed cities, heating comfort is guaranteed approximately as defined, whereas in the cooling case it is excessively guaranteed. Besides, secondary energy used are high quality respect to service requirements. It is also observed that appliances upgrading saves less secondary energy compared to building insulation, but if embodied energy in goods and services involved in interventions are accounted, primary energy savings are higher in the first case.

Agradecimientos

En primer lugar, expreso un profundo agradecimiento a Emanuela y Matteo, por haber aceptado el desafío y dirigir con gran dedicación y paciencia el trabajo, con el esfuerzo que esto significó. El acompañamiento constante, riguroso y generoso de Matteo ha sido la brújula que en todo momento marcó el camino de la investigación.

Agradezco enormemente a Rita, quien en su tarea de co-directora ha acompañado, guiado y revisado el trabajo en todos sus detalles, con el entusiasmo y la dedicación propios de una persona comprometida con la ciencia y la enseñanza.

Gracias a Analía, por su silenciosa pero persistente colaboración, quien a la par de Rita, me ha mostrado el fascinante mundo de la investigación. La generosidad de ambas merece un especial reconocimiento.

Muchas gracias a Marco por sus desinteresados aportes y compañía en cuestiones energéticas.

Un especial agradecimiento también para quienes en el último tiempo hemos compartido la tarea de difusión de la eficiencia energética en diversos ámbitos: colegas de la Secretaría de Estado de la Energía de la Provincia de Santa Fe, de la Universidad Nacional de Rafaela, de la Secretaría de Energía de la Nación, del Proyecto “Eficiencia Energética en Argentina”, y de los distintos Colegios Profesionales.

Agradezco a mis colegas y alumnos de la Universidad, con quienes comparto el día a día y de quienes he aprendido mucho durante estos años.

Y por supuesto, un infinito agradecimiento a mi familia y a mis grandes amigos por acompañarme en este recorrido.

Índice

Resumen	2
Abstract	3
Agradecimientos	4
Nomenclatura	8
Sumario	15
Contexto y Motivación	15
Necesidad de Información acerca de los Usos Finales de Energía	16
Objetivos de la Investigación	17
Logros de la Investigación	18
Estructura de la Tesis	19
1. Introducción	20
1.1. Nuevo Paradigma en los Sistemas Energéticos	20
1.2. El Uso Final de la Energía como Destino de Políticas Públicas	21
1.3. Limitaciones de los Balances Energéticos Tradicionales	22
1.4. Propuesta de Metodología de Extensión de Balances Energéticos	24
1.4.1. Evaluación del Servicio Energético mediante definición de la Unidad de Prestación	24
1.4.2. Definición del grado de Acoplamiento entre Calidad de Energía y Exigencia de Servicio Energético	25
1.4.3. Cuantificación del Impacto Global de Intervenciones en Usos Finales mediante el Análisis Input-Output	26
1.5. Aplicabilidad de la Metodología Propuesta	27
2. Revisión Bibliográfica y Marco Teórico-Conceptual	28
2.1. Metodologías de Balances Energéticos actualmente utilizadas	28
2.1.1. Balances de Energía Neta	29
2.1.2. Balances de Energía Útil	31
2.2. Eficiencia Energética, Indicadores de Eficiencia Energética, Servicio Energético	33

2.2.1.	Definición de Eficiencia Energética	33
2.2.2.	Indicadores de Eficiencia Energética	34
2.2.3.	Crítica a los Indicadores de Eficiencia Energética	35
2.2.4.	Servicio Energético	38
2.2.5.	El servicio Energético cómo Objetivo del Sistema Energético	39
2.3.	Exergía.....	39
2.3.1.	Definición de Exergía, Antecedentes y Aplicaciones	40
2.3.2.	Balances de Exergía.....	41
2.4.	Contabilización de Costos Energéticos	47
2.4.1.	Conceptos Preliminares.....	47
2.4.2.	Contabilización de Recursos Energéticos: Producción o Consumo	50
2.4.3.	Análisis de Proceso	52
2.4.4.	Análisis Input-Output	54
2.4.5.	Equivalencia Matemática entre el Análisis de Proceso y el Análisis Input-Output.....	71
3.	Formalización de la Metodología Propuesta	72
3.1.	Unidad de Prestación	72
3.1.1.	Aspectos Preliminares y Conceptualización.....	73
3.1.2.	Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración	77
3.1.3.	Definición de las Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración.....	79
3.1.4.	Cálculo de las Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración	82
3.1.5.	Unidad de Prestación, Requerimiento y Consumo de Energía.....	91
3.1.6.	Balance de Energía Extendido	94
3.2.	Acoplamiento entre Calidad de Energía y Exigencia del Servicio Energético	99
3.2.1.	Exigencia de la Unidad de Prestación.....	99
3.2.2.	Calidad de los Flujos de Energía.....	101
3.2.3.	Acoplamiento Calidad Exigencia	103
3.3.	Evaluación del Impacto Global de Intervenciones en el Uso Final de Energía.....	106
3.3.1.	Análisis Upstream del Balance Energético Extendido	106
3.3.2.	Análisis IO.....	108

4. Caso de Aplicación.....	119
4.1. Datos de Referencia y Supuestos Preliminares	119
4.1.1. Definición de Unidades de Prestación y Extensión del Balance Energético.....	120
4.1.2. Nivel de Acoplamiento entre Calidad y Exigencia	123
4.1.3. Evaluación del Costo Energético Primario	124
4.2. Resultados y Discusión	128
4.2.1. Definición de Unidades de Prestación y Extensión del Balance Energético.....	128
4.2.2. Nivel de Acoplamiento entre Calidad y Exigencia	136
4.2.3. Evaluación del Costo Energético Primario	139
5. Conclusiones	142
Publicaciones del Autor.....	146
Actividades de Transferencia al Medio realizadas por el Autor	147
Bibliografía	149
Anexo	159

Nomenclatura

Símbolos

H	entalpía, $kWh - J - kcal$
Q	calor, $kWh - J - kcal$
W	trabajo mecánico, $kWh - J - kcal$
Ex	exergía, $kWh - J - kcal$
I	destrucción de exergía interna al sistema, $kWh - J - kcal$
N	número de flujos distintos de materia entrantes o salientes de un sistema
M	número de flujos distintos de calor entrantes o salientes de un sistema
L	número de trabajos distintos entrantes o saliente de un sistema
T	temperatura, K
S	entropía, $kWh/K - J/K$
η_I	eficiencia exergética simple
η_{II}	eficiencia exergética considerando pérdidas
Ψ	eficiencia exergética racional
f	demanda final
x	producto intermedio
k	consumo de recursos de un proceso
R	recursos exógenos absorbidos
c	costo de recursos de un proceso
n	número de procesos productivos
$\mathbf{x}$	vector de producción total
$\mathbf{C}$	costo de recursos exógenos
$\mathbf{f}$	vector de demanda final
$\mathbf{A}$	matriz de coeficientes técnicos
$\mathbf{b}$	vector de recursos exógenos requeridos por unidad de producto
$\mathbf{Z}$	matriz de demanda intermedia
$\mathbf{VA}$	matriz de valor agregado

f	matriz de demanda final
R	matriz de recursos exógenos
W	matriz de emisiones exógenas
<i>x</i>	demanda intermedia de bienes y servicios
i	vector columna con todos sus elementos iguales a uno
L	matriz inversa de Leontief
c	matriz de costos específicos de recursos exógenos / generación de residuos
C	matriz de costos totales de recursos exógenos / generación de residuos
r	matriz de intervención o matriz de ingreso
U	matriz de uso
V	matriz de producción
e	vector de demanda final
B	matriz equivalente a la matriz de coeficientes técnicos en enfoque producto industria
x	vector de producción total de sectores o industrias
x	vector de producción total de productos
D	matriz de proporciones de producción
L_{pp}	matriz de requerimientos totales producto-producto
L_{pi}	matriz de requerimientos totales sector-producto
<i>UP</i>	unidad de prestación, kWh/p
<i>zc</i>	condición climática, kWh/m^2
<i>c</i>	condición de confort, m^2/p
<i>D</i>	días de calefacción o refrigeración
<i>θ</i>	temperatura, $^{\circ}C - K$
<i>A</i>	área promedio, m^2
<i>O</i>	ocupación promedio, <i>p</i>
<i>a</i>	fracción de área
<i>I</i>	irradiancia, W/m^2
<i>M</i>	número de meses de calefacción o refrigeración
<i>S/A</i>	relación superficie de envolvente – superficie, m^2/m^2
<i>b</i>	factor de ajuste promedio que considera temperatura de ambientes adyacentes

U	transmitancia de envolvente opaca, W/m^2K
U_w	transmitancia de envolvente transparente, W/m^2K
e	fracción de superficie de envolvente transparente sobre envolvente total
α	coeficiente de absorción medio
g	coeficiente de absorción medio
H	coeficiente de intercambio térmico específico, W/m^2K
τ	constante de tiempo, h
Q	energía térmica específica / requerimiento específico de energía, kWh/m^2
T	horas del mes, h
F_v	factor de vista
R_{se}	resistencia superficial externa, m^2K/W
h_{rad}	coeficiente de intercambio radiativo, W/m^2K
γ	relación de ganancias y pérdidas
α	parámetro numérico adimensional de ajuste
ξ	variable genérica que representa cualquier parámetro del prototipo de vivienda de prueba
ρ	valor positive pequeño a voluntad
E	requerimiento de energía, $kWh - tep$
$\tilde{E}$	consumo de energía, $kWh - tep$
f_p	factor de conversión a energía primaria
η_e	rendimiento de equipamiento
η_c	rendimiento de contexto
EUP	exigencia de la unidad de prestación
HV	poder calorífico inferior, J/kg
β	factor beta de Szargut
ε	índice de acoplamiento de calidad de energía y exigencia de la prestación
λ	fracción de unidad de prestación
L	número de energías secundarias que se utilizan para un servicio energético
p	relación entre consumo asociado a una unidad de prestación y consumo total
N	habitantes, p
C	costo energético de la unidad de prestación, $kWh/p - tep/p$

ς	unidades monetarias, <i>USD</i>
Y	horizonte de inversión / vida útil de una intervención, <i>años</i>
I	costo de intervención, <i>USD</i>
CF	costo financiero
r	tasa de interés de referencia
f	flujos monetarios anuales para sectores de capital, trabajo y financiero

Subíndices

<i>M</i>	masa
<i>in</i>	ingreso
<i>out</i>	salida
<i>Q</i>	calor
<i>W</i>	trabajo mecánico
<i>u</i>	útil
<i>l</i>	pérdidas
<i>rev</i>	reversible
<i>gen</i>	generación
<i>obj</i>	objetivo
<i>amb</i>	ambiente
<i>tot</i>	totales
<i>PB</i>	basado en la producción
<i>CB</i>	basado en el consumo
<i>c</i>	calefacción
<i>r</i>	refrigeración
<i>obj</i>	objetivo
<i>conf</i>	confort
<i>inm</i>	inmueble
<i>clim</i>	climatizada
<i>ext</i>	exterior
<i>sol</i>	solar
<i>0</i>	referencia
<i>op</i>	envolvente opaca
<i>tr</i>	envolvente transparente
<i>tr</i>	transmisión
<i>inf</i>	infiltración
<i>rad</i>	radiación

<i>gr</i>	gratuito de origen solar
<i>disp</i>	dispersiones
<i>u</i>	útil
<i>s</i>	secundaria
<i>p</i>	primaria
<i>mín</i>	mínima
<i>máx</i>	máxima
<i>erog</i>	erogación
<i>ev</i>	evaporador
<i>quím</i>	química
<i>res</i>	residencial
<i>K</i>	capital
<i>W</i>	trabajo
<i>F</i>	financiero
<i>N</i>	Norte
<i>S</i>	Sur
<i>E</i>	Este
<i>O</i>	Oeste
<i>H</i>	Horizontal
<i>EE</i>	Energía eléctrica
<i>GN</i>	Gas Natural

Abreviaturas y Acrónimos

PBI	Producto bruto interno
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts
IEA	Agencia Internacional de la Energía
TPES	Oferta total de energía primaria
TFC	Consumo final total
HDI	Índice de desarrollo humano
LCA	Análisis de Ciclo de Vida
PBA	Contabilidad basada en la producción
CBA	Contabilidad basada en el consumo
PA	Análisis de Proceso
IFIAS	Federación Internacional de Institutos para Estudios Avanzados
IOA	Análisis Input-Output
IO	Input-Output
IOT	Matriz Insumo-producto
LPM	Balance de producción de Leontief
LCM	Balance de costos de Leontief
SUTs	Cuadros de oferta y utilización
ROS	Rosario
MZA	Mendoza
BRC	San Carlos de Bariloche
TUC	San Miguel de Tucumán
BUE	Ciudad Autónoma de Buenos Aires
INDEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Argentina
ENARGAS	Ente Nacional Regulador del Gas (Argentina)
CAMMESA	Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (Argentina)
MRIO	Modelo Input-Output multiregional
COP	Coeficiente de performance

Sumario

Contexto y Motivación

En las últimas décadas, la eficiencia energética se ha consolidado a nivel mundial como una de las formas de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, en la Argentina el concepto recién comenzó a hacer una tímida incursión en la política energética a partir del año 2015. Los subsidios a las tarifas energéticas imperantes desde principios del 2000, actuaban como principal barrera para la instalación del tema en los sectores de consumo final de energía (Mastronardi and Mayer, 2015). A partir del paulatino sendero de quita de subsidios a las tarifas energéticas, los distintos sectores de la economía comenzaron a incursionar en cambios gestionales y tecnológicos relacionados con la eficiencia energética.

La eficiencia energética puede ser una de las medidas de respuesta ante la coyuntura de corto plazo al mismo tiempo que genera altos niveles de optimización y ahorro económico en las proyecciones al 2035. En un contexto global donde predomina la innovación tecnológica, crecen sistemas de transmisión a través de redes inteligentes y se refuerzan los compromisos internacionales frente al cambio climático, Argentina debería promover un conjunto de prácticas de bajo costo con alto impacto de ahorro y al mismo tiempo cubrir sus necesidades de infraestructura energética promoviendo incentivos para el ingreso de tecnologías más eficientes (Fernández, 2015).

Si bien existían regulaciones aisladas en el país e instituciones provinciales y locales de fomento a las energías renovables y la eficiencia energética, la única normativa nacional vigente en temas de eficiencia energética es a la fecha el Decreto 140/2007 (Presidencia de la Nación, 2007). Sobre finales del año 2015 se crea la Subsecretaría de Ahorro y Eficiencia Energética dentro del Ministerio de Energía y Minería, luego bajo la órbita del Ministerio de Hacienda desde octubre del año 2018, como entidad dedicada específicamente a tareas de planificación y aplicación de programas en los sectores de consumo (Presidencia de la Nación, 2015). A partir de diciembre de 2019 la política energética fue delegada al Ministerio de Desarrollo Productivo, quedando, al día de la fecha, aún por definir la posición específica en el organigrama de los temas de eficiencia energética (Presidencia de la Nación, 2019).

Al no existir previamente organismos nacionales abocados a esta temática, no se cuenta actualmente con información de estadísticas energéticas enfocadas al consumo, por lo tanto, es necesario un trabajo de elaboración de datos estadísticos con los fines de hacer diagnósticos de situación y brindar el sustrato de información a los decisores públicos para una correcta y pertinente planificación de políticas públicas de eficiencia energética en los usos finales.

El potencial de la eficiencia energética es muy alto en la República Argentina. La oferta total de energía primaria en el país se observa totalmente elástica al producto bruto interno (PBI) (Ministerio de Energía y Minería, 2017), lo que muestra el gran atraso respecto de otros países, en los cuales las distintas políticas de eficiencia energética han logrado desacoplar las curvas de consumo de energía respecto de producto bruto

interno. A su vez, la matriz energética de Argentina muestra una elevada dependencia del consumo de energías fósiles, alcanzando éstas aproximadamente un 86% de la demanda total de energía primaria (Ministerio de Desarrollo Productivo, 2018) por lo que los potenciales impactos en la reducción de gases de efecto invernadero producto del aumento de la eficiencia energética pueden considerarse muy auspiciosos.

Necesidad de Información acerca de los Usos Finales de Energía

Históricamente los sistemas energéticos fueron concebidos desde la oferta, entendiendo a los sectores de consumo como simples *consumidores* de energía *sin importar en qué se usaba, para qué se usaba y cómo se usaba* dicha energía. Afortunadamente, desde hace algunas décadas el paradigma de los sistemas energéticos ha comenzado a cambiar, prestando atención a las transformaciones que suceden en los sectores de consumo final. La eficiencia energética en los sectores de consumo final jugará un rol preponderante en las próximas décadas, como forma de limitar el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (International Energy Agency, 2018a).

Establecer políticas de eficiencia energética en el consumo final, desafía a los entes gubernamentales pues a diferencia de los sectores de oferta, los sectores de consumo han sido históricamente poco intervenidos, en especial en los países en vías de desarrollo. Estos países, urgidos por otras prioridades como el acceso a la energía, energía de calidad o pobreza energética, aún no han incursionado en políticas de eficiencia energética en usos finales de forma sistémica y planificada.

Con el advenimiento de políticas de eficiencia energética en los usos finales de energía, emerge la necesidad de contar con información respecto de cómo se consume la energía, para qué, de qué forma, en qué usos, y fundamentalmente que *beneficio* o *servicio energético* se obtiene a partir de dicho consumo (Cullen and Allwood, 2010a; Fundación Bariloche and Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, 2009). En el sector residencial en particular, la poca calidad de la información disponible en ciertos países constituye una de las principales barreras que impiden la implementación de medidas de eficiencia energética de alta relación beneficio-coste (Zabaloy et al., 2019), por lo que resulta importante avanzar en este sentido.

Resulta entonces necesario formalizar y estructurar sistemas de información energética capaces de reflejar de forma detallada cómo acontecen los procesos de consumo final de energía y fundamentalmente cuáles son los beneficios que se obtienen a partir de su uso. Esta información permitiría, entre otras cosas, poder mejorar el diseño e implementación de políticas públicas de eficiencia energética en usos finales, otorgando al estado posibilidades de intervención en los sectores de consumo, pudiendo incluso compararse estas políticas sobre la demanda de energía con políticas orientadas a la oferta de energía.

Objetivos de la Investigación

El objetivo general del presente trabajo de Tesis es desarrollar una *metodología que complemente la información provista por los balances energéticos nacionales*, para el estudio y caracterización de los sistemas energéticos desde la oferta de energía primaria hasta la provisión final de servicios y/o productos que movilizan la demanda de energía, atendiendo especialmente a la sistematización de la información de manera de constituirse en un insumo para la elaboración de políticas públicas de eficiencia energética en usos finales.

En primer lugar, se definirá la *unidad de prestación* como cuantificación de los servicios energéticos (i.e. de los beneficios que se obtienen de la utilización de la energía). Luego, se propondrá una forma de analizar el uso final de la energía que contemple la *calidad* del energético utilizado en relación a la *exigencia del servicio* para el cual se utiliza, recurriéndose al concepto de *exergía* para tal fin. Finalmente, en base a un Análisis Input-Output se desarrollará una metodología para *evaluar los impactos globales* debido a intervenciones de eficiencia energética en los usos finales, de forma de poder abarcar también los efectos *directos e indirectos* de dichas intervenciones.

Asimismo, como el objetivo fundamental del presente trabajo es complementar información energética de manera de utilizarse a modo de insumo para el diseño, implementación y evaluación de políticas públicas; la metodología a continuación propuesta deberá poseer las siguientes características:

- Ser sencilla de comprender y aplicar por organismos e institutos gubernamentales.
- Ser aplicable con estadísticas energéticas y datos de los sistemas de cuentas nacionales ya disponibles, sin necesidad de incursionar en encuestas, trabajos de campo o relevamientos ad hoc.
- Ser aplicable de forma total o parcial según límite y alcance definido por la autoridad, en función del interés, disponibilidad de datos, o cualquier otro criterio que se considere.
- Ser comparable en sus resultados entre distintos países, regiones, ciudades o universo de aplicación; y a lo largo de los años, de forma de poder evidenciar y reflejar los eventuales cambios productos de políticas de eficiencia energética aplicadas en base a la información provista por la presente metodología.

Si bien los conceptos vertidos en el presente trabajo pueden aplicarse a los diferentes usos dentro cada uno de los cinco sectores de consumo, *sólo se formalizará la metodología para los usos de calefacción y refrigeración de ambientes*, ambos usos englobados en los consumos del sector residencial. La acotación se fundamenta en los siguientes argumentos: la climatización de ambientes explica la mayor parte del consumo residencial de Argentina; existe un gran atraso en los niveles de eficiencia en ellos por lo que el potencial de mejoras en la eficiencia de dichos consumos es muy alto; si bien los datos disponibles no son actualizados ni representan de forma fidedigna la realidad, se pueden construir e inferir datos con el objeto de ejemplificar la metodología. Además de los argumentos expuestos, se considera que la aplicación al caso de calefacción y refrigeración explotará al máximo las cualidades del método y las oportunidades que de él se desprendan; debido a la transparencia de estos procesos y el carácter testimonial y educativo de los mismos, dado que,

en relación a otros usos energéticos su entendimiento resulta relativamente sencillo para la comunidad de técnicos y decisores relacionados con la energía. Por otro lado, los necesarios modelos teóricos de cálculo de requerimientos de energía para calefacción y refrigeración están muy desarrollados y ampliamente difundidos en el ámbito académico y profesional. De esta manera, podrían extrapolarse las formulaciones presentes a otros usos y gracias al aporte de la comunidad científica lograr extender la metodología a todo el universo de consumos, e incluso mejorarla.

Como caso de estudio se aplicará la metodología a cinco ciudades de la República Argentina: Rosario, Mendoza, San Carlos de Bariloche, San Miguel de Tucumán y Ciudad Autónoma de Buenos Aires, extendiendo los balances energéticos para cada una de las mencionadas ciudades y evaluando el impacto global en el consumo de energía primaria para distintos escenarios de mejoras en la eficiencia energética en los usos de calefacción y refrigeración.

Logros de la Investigación

Los objetivos generales propuestos han sido logrados, pues no obstante habiéndose desarrollado la metodología de forma acotada (i.e. sólo para calefacción y refrigeración de ambientes), la estructura de la misma evidencia el cumplimiento de las características a priori exigidas, y los resultados obtenidos del caso de aplicación reflejan el sustancial aporte a la comprensión de los procesos de consumo, sus causas de ineficiencias, las posibilidades de intervención mediante políticas específicas y los efectos de dichas intervenciones en los recursos de energía primaria. A modo de síntesis, *la metodología permite conocer el consumo directo e indirecto de energía primaria (i.e. el costo energético primario) para garantizar un determinado servicio energético, antes y después de intervenciones de eficiencia en el sector de consumo final.*

A partir de una precisa definición de lo que se llamará *unidad de prestación* se establece la forma de cuantificar los beneficios obtenidos del uso de la energía, lo que en la literatura científica es conceptualizado aún de forma imprecisa como *servicio energético*, pudiendo proveer información detallada de cómo se dan las transformaciones de energía secundaria en energía útil, y de energía útil en servicio energético. Luego, acuñando el concepto de exergía como medida de la calidad de la energía, el método permite estudiar el acoplamiento entre la calidad del energético y la exigencia del proceso para el cual dicho energético se emplea, observándose del caso de aplicación. Finalmente, recurriendo al Análisis Input-Output se pueden cuantificar efectos indirectos de intervenciones en la eficiencia de las transformaciones en los sectores de consumo final a los efectos de determinar el impacto global en el consumo de recursos energéticos primarios.

La aplicabilidad de la metodología propuesta, dada la posibilidad de implementarla de forma parcial según límite y alcance definido, basándose en datos ya disponibles de estadísticas energéticas y sistemas de cuentas nacionales se puede considerar una característica ventajosa del método. Del mismo modo, la alta

comparabilidad de sus resultados producto de la aplicación en distintos países o regiones también es una característica digna de ser destacada.

Estructura de la Tesis

La Tesis se estructura en 5 Capítulos, además del presente Sumario, Bibliografía y Anexo. El Capítulo 1 presenta una introducción a todo el trabajo, planteando las falencias que presentan los balances de energía actualmente utilizados y las propuestas que se sugieren a los fines de complementar la información provista por dichos balances. El Capítulo 2 proporciona una revisión bibliográfica necesaria para establecer un marco teórico de los temas y conceptos sobre los que se basará la propuesta metodológica posterior: en primer lugar se realiza una revisión crítica de las distintas metodologías existentes de balances energéticos, luego se presenta una crítica sobre los distintos indicadores de eficiencia energética, posteriormente se introduce el concepto de exergía como forma de referirse a la calidad de los flujos energéticos y finalmente se presenta un sucinto resumen referido a las distintas metodologías de cuantificación y contabilización de costos ambientales en una economía. En el Capítulo 3 se formula la metodología propuesta, en sus tres partes: definición de unidad de prestación como cuantificación del servicio energético, acoplamiento de calidad entre oferta y demanda y evaluación del impacto en términos globales de intervenciones de eficiencia energética. En el Capítulo 4 se presenta un caso de aplicación de la metodología completa para cinco ciudades de la República Argentina, enumerando los datos y supuestos utilizados, y brindando los resultados junto con la correspondiente discusión. Finalmente, en el Capítulo 5 se exhiben las principales conclusiones del trabajo, se mencionan posibles investigaciones relacionadas y desarrollos futuros, y se sugieren posibilidades de aplicación de los resultados obtenidos.

1. Introducción

En el presente Capítulo, se presenta el contexto energético en el cual se plantea y desarrolla el presente trabajo. Se describen las principales características distintivas de una nueva forma de concebir los sistemas energéticos en los cuales el consumo adquiere relevante significancia, no sólo por considerarse un eslabón más en la cadena energética, sino porque en dicho eslabón yacen los mayores potenciales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Luego, se ponen en evidencia las limitaciones de los sistemas de información energética en cuanto a la posibilidad que brindan de tomar decisiones de política energética sobre los sectores de consumo. Finalmente, con motivación en las falencias anteriores se introduce la formulación metodológica objeto del presente trabajo de Tesis.

1.1. Nuevo Paradigma en los Sistemas Energéticos

El crecimiento económico mundial suscitado finalizada la Segunda Guerra Mundial se basó en un paradigma de recursos ilimitados, siendo el consumo el elemento movilizador de toda la actividad económica. El enfoque de los sistemas energéticos no estuvo ajeno a esta mirada, instaurándose el paradigma de que el consumo energético *tracciona* la oferta, considerada ilimitada en términos de recursos y posibilidades de explotación. Según este enfoque, los consumidores sólo prestan atención a las cantidades de consumo de dichos vectores sin tener en cuenta qué necesidades pretenden ser satisfechas. La consecuencia de esta arquitectura económica es la desatención a la eficiencia energética en los usos finales por parte del sistema energético, pues la esencia última no es proveer un determinado servicio sino el consumo por consumo en sí (Organización Lationamericana de Energía, 2017).

A partir del año 1972 se inició una transformación más que sustancial de la historia mundial. Por primera vez distintos países nucleados en el Club de Roma abordan el presente y futuro ambiental y encargan al Instituto Tecnológico de Massachusetts (*MIT – Massachusetts Institute of Technology – por sus siglas en inglés*) realizar un estudio sobre el tema (Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, 1972). El resultado de dicho estudio fue la publicación *Los Límites del Crecimiento (The Limits to Growth)*, que mediante modelos matemáticos predecía, en un futuro no mayor a cien años, el colapso de la actividad económica y la capacidad industrial del planeta fruto de la descontrolada utilización de recursos naturales, sin darle a los ecosistemas tiempo de regenerarse. Si bien este modelo fue cuestionado desde el punto de vista técnico y filosófico (Herrera et al., 1977) no puede objetarse la trascendencia en cuanto a la instalación de un tema que hasta ese momento no era considerado por la comunidad científica, como lo es el carácter escaso de los recursos naturales y las posibilidades de continuación de un modelo económico productivo vigente. Inmediatamente después se suscitó la crisis del petróleo, que si bien se debió a razones geopolíticas representó un cimbronazo al modelo de crecimiento de posguerra. Siguió el *Informe Brundtland* (Commission on Environment, 1987), que introdujo el concepto de desarrollo sostenible como aquel que

satisface las necesidades presentes sin comprometer las necesidades futuras; y las distintas convenciones y acuerdos internacionales inherentes al cambio climático y la necesidad de reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

La preocupación ambiental no es el único factor que demarca la búsqueda de alternativas energéticas, pues el carácter limitado de los recursos fósiles, los esfuerzos cada vez más osados en su extracción (e.g. exploración off shore, shale gas y shale oil) se traduce en precios inestables que pueden poner en riesgo el sistema productivo de cualquier país (Odum, 1973; Solomon, S. et al., 2007). Según datos de Agencia Internacional de la Energía (IEA), el 75% de la matriz de oferta primaria mundial está basada en combustibles fósiles, por lo tanto la estabilidad de las modernas economías están íntimamente ligadas a los recursos fósiles (Odum, 1973; Solomon, S. et al., 2007).

Sea por opción o necesidad, convencimiento o persuasión, cada vez más los distintos países tratan de reducir la dependencia de los hidrocarburos, esta tarea no es nada fácil pues no consiste simplemente en sustituir un combustible, sino que se trata de cambiar todo un modelo productivo, un verdadero *cambio de paradigma*. Uno de los pilares fundamentales de este cambio de paradigma consiste en migrar de sistemas energéticos traccionados por la demanda, que consideran ilimitadas las fuentes que lo alimentan, a sistemas que operan con restricciones en los recursos, implicando esto una mirada integral desde el inicio hasta el final de la cadena energética (Cullen and Allwood, 2010b). Incluso, en países en vías de desarrollo, en los que no se suministra la necesaria energía para un mínimo bienestar, de tener que suministrarla con los sistemas actuales, el recurso evaluado en energía primaria sería muy alto dada la ineficiencia de toda la cadena energética, no sólo en la generación, transporte y distribución, sino fundamentalmente en la etapa de consumo final.

1.2. El Uso Final de la Energía como Destino de Políticas Públicas

Si bien los distintos países se suman progresivamente al nuevo paradigma energético, los enfoques tradicionales e imperantes de análisis de sistemas energéticos todavía están muy *orientados desde la oferta*, es decir enfocados en la gestión de la producción, conversión y distribución de energía y uso final en la forma de vectores energéticos (Jonsson et al., 2011). Se condice este comportamiento con el hecho de que los estados de forma directa o indirecta regulan a los actores involucrados en estos procesos, pues la producción, transformación, transporte y distribución de energía conforman un mercado regulado. Asimismo, en este mercado el nivel de concentración es muy alto, por lo que las regulaciones pueden dirigirse incluso de forma puntual a cada uno de los participantes. Esta característica del mercado de oferta de energía hace que de forma relativamente sencilla la autoridad energética pueda instrumentar políticas públicas, mandatorias, o de cualquier índole, a efectos de hacer converger los sistemas de oferta de energía hacia la eficiencia. Por el contrario, la forma de realizar políticas de eficiencia energética en los sectores de consumo final nada tiene que ver con políticas de eficiencia en los sectores de transformación. Los sectores de consumo son heterogéneos, de pequeñísima escala, distribuidos, y atomizados.

Bajo el nuevo paradigma de un enfoque integral de los sistemas energéticos, la eficiencia global de los mismos debe entenderse como las prestaciones o servicios que el sistema brinda en relación al recurso energético primario involucrado. Haciendo un estudio global de los flujos energéticos se pueden identificar las áreas con más posibilidades de mejora, pudiéndose orientar futuras investigaciones y políticas públicas en el campo de la eficiencia energética (Cullen and Allwood, 2010b, 2010c). Sucede actualmente que el sector de consumo es un eslabón tan importante como todos los otros en cuanto objeto de políticas de eficiencia energética, por lo tanto las políticas públicas enfocadas en este sector deben considerarse al mismo nivel de importancia que las políticas sobre los sectores de oferta y someterse a los mismos criterios de análisis y evaluación (Murray-Leach, 2019). Para reforzar lo anterior, y según proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía (*IEA – International Energy Agency – por sus siglas en inglés*), es en la etapa de consumo final en donde reside el gran potencial de mejora de la eficiencia de todo el sistema energético en su conjunto (International Energy Agency, 2018b).

Por lo tanto, al considerar el consumo final como una etapa de todo el sistema energético, y para poder mejorar la eficiencia en dicha etapa, es necesario contar con información detallada de los procesos de consumo y poder integrar dicha información en un análisis completo de los sistemas energéticos (European Union, 2013; International Energy Agency, 2014a). Es necesario para las autoridades energéticas poseer información referida a qué energía se utiliza, cómo se la utiliza, para qué se la utiliza, y qué beneficio se obtiene a partir de su uso. Los balances energéticos, en sus concepciones metodológicas tradicionales, presentan significativas limitaciones en cuanto a la información que proveen sobre el consumo final de energía, constituyendo estas limitaciones un primer obstáculo para el diseño, implementación y evaluación de políticas de eficiencia energética en usos finales.

1.3. Limitaciones de los Balances Energéticos Tradicionales

Los balances energéticos son la primera matriz de información para el análisis de sistemas energéticos, constituyéndose los mismos en pilares fundamentales sobre los cuales se apoya cualquier análisis energético que se pretenda realizar de un país o región. Por la historia misma de los sistemas energéticos, las distintas metodologías de elaboración de balances actualmente difundidas y utilizadas por la mayoría de los países se enmarcan en un enfoque *desde la oferta*, sin darle un tratamiento detallado y riguroso a la información respecto de los consumos. En la concepción actual de los mismos, el consumo de energías secundarias o vectores energéticos constituyen las *salidas*, mientras que los flujos de energía primaria constituyen las *entradas*. Mediante su recorrido inverso, permiten conocer la energía primaria asociada a una unidad de energía secundaria o vector energético en la etapa de uso final. A partir de esto, con la información provista por los balances energéticos tradicionales, el grado de consumo de recursos de un sistema energético vendría determinado por los flujos energéticos primarios necesarios para poder garantizar el consumo de energía secundaria en los sectores de uso final.

Para poder avanzar en políticas de eficiencia energética en usos finales, la información que actualmente brindan las metodologías de balances energéticos más difundidas entre los países no resulta ser suficiente. En particular, dichas metodologías presentan las siguientes carencias o limitaciones:

- *No reflejan los beneficios obtenidos a partir del uso de la energía*

Brindan información acerca del consumo de energía secundaria, y en algunos casos avanzan un paso más analizando los flujos de energía útil, pero no permiten evaluar ni cuantificar los servicios y beneficios generados a partir del consumo de dicha energía secundaria o útil. En los últimos años el concepto de *servicio energético* ha sido acuñado por la literatura científica para referirse específicamente a estos beneficios, y su inclusión y cuantificación no están abarcados en las metodologías de balances tradicionales. A modo de ejemplo, la información brindada por balances energéticos tradicionales permite conocer cuánta energía secundaria se utiliza para calefacción, incluso en algunos casos cuánta energía térmica se proporciona a los ambientes, pero dicha información *no es suficiente* para identificar si el usuario logra estar en una *situación de confort*, o dicho de otra forma qué nivel de confort térmico se está garantizando al usuario (International Energy Agency, 2017). Cuando se intenta determinar los potenciales cambios debidos a un incremento de la eficiencia energética, la demanda de energía no debe interpretarse como sinónimo de la demanda de energías secundarias o vectores energéticos, ni tampoco como la demanda de servicios mensurables (kilómetros recorridos, metros cuadrados climatizados, etc.) sin considerar el contexto sociocultural en el cual se utilizan dichos servicios (Jonsson et al., 2011).

- *No reflejan la degradación en los procesos de transformación*

Los balances energéticos tradicionales son elaborados en base al *Primer Principio de la Termodinámica*, esto significa que se constituyen en términos de *cantidad*. Si se quisiera conocer la degradación que se produce en los flujos energéticos como consecuencia de las transformaciones que se llevan a cabo desde la energía primaria hasta la energía útil, en cambio sería necesario recurrir al *Segundo Principio de la Termodinámica* y realizar un balance que contemple también la *calidad* de la energía entrante y saliente de cada proceso. Si bien esta limitación de información no es exclusiva para el sector de consumo final, sino que se da en todas las transformaciones de la cadena energética, es en el consumo final en donde se observan grandes degradaciones de calidad, ocasionadas por el uso de energías secundarias de *alta calidad* para demandas *poco exigentes*.

- *No reflejan la interacción de los diferentes sectores de consumo*

En el caso de querer evaluar intervenciones de eficiencia energética en usos finales, los balances energéticos tradicionales evidenciarán el ahorro de energía primaria causado por la reducción del consumo de energías secundarias del sector específico en los que se instrumentó la mejora, pero no se observarán las variaciones de consumo de energía primaria ocasionadas por el incremento en la producción de bienes y servicios necesarios para sustanciar dichas intervenciones. En otras palabras, se observarán *efectos directos*, pero no

se podrán constatar ni cuantificar los *efectos indirectos*, que en muchos casos pueden ser significativos hasta el punto de tener un efecto incluso negativo en términos globales.

1.4. Propuesta de Metodología de Extensión de Balances Energéticos

Las limitaciones de las actuales metodologías de elaboración de balances energéticos enunciadas en la Sección precedente motivan la propuesta del presente trabajo de Tesis. Los procedimientos que se enunciarán en los siguientes capítulos no se contraponen con las distintas metodologías de balance existentes, sino que *las complementan en los aspectos considerados débiles*. Por lo tanto, la metodología propuesta no debe ser entendida como una alternativa para la confección de balances energéticos (sobre lo que hay mucha bibliografía y metodologías ampliamente adoptadas y convenidas por distintos países), sino como un *complemento a las mismas para posibilitar el diseño, aplicación y evaluación de políticas de eficiencia energética en usos finales*.

Con el objetivo de subsanar entonces las limitaciones que fueron enumeradas, se presentarán conceptos y enfoques específicos que una vez formalizados podrán incorporarse a la confección de balances nacionales a modo de complemento de los mismos. A cada limitación específica le será asignada una propuesta particular que logre complementar la información en ese sentido, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Limitaciones de las metodologías actuales de balances energéticos y propuestas para su complemento.

Limitación	Propuesta
Desconocimiento del beneficio que se obtiene a partir del uso de la energía.	Cuantificación del servicio energético mediante definición de la unidad de prestación.
Falta de información sobre la degradación en los procesos de transformación.	Definición del grado de acoplamiento entre calidad de energía y exigencia de servicio energético.
Falta de interacción entre distintos sectores de consumo.	Evaluación del impacto global de intervenciones en usos finales mediante el Análisis Input-Output.

1.4.1. Evaluación del Servicio Energético mediante definición de la Unidad de Prestación

Para poder complementar los balances energéticos tradicionales en relación a la primera limitación expuesta, es necesario cuantificar los beneficios que se derivan del uso de la energía. Si bien la energía es naturalmente demandada por los servicios y beneficios que su uso proporciona y no por su uso en sí, esta característica de

la demanda rara vez es considerada explícitamente en los análisis empíricos de la demanda (Hunt and Ryan, 2015). El concepto de *servicio energético* fue acuñado por la comunidad científica para referirse a los beneficios que el uso de la energía proporciona. Desde la década del noventa, se comenzó a prestar más atención a los sectores de consumo y es en dicho contexto que la idea de servicio energético emerge en la literatura, como forma de diferenciar el consumo de energía útil respecto de los servicios o beneficios que se obtienen a partir del uso de la energía. Sin embargo, dado lo reciente de su aparición, este concepto todavía no está universalmente unificado en la literatura. Fell, luego de revisar 185 artículos de las revistas *Energy Policy* y *Energy Research and Social Science*, relevó 27 diferentes definiciones de servicio energético. En base a ello, propuso una definición del mismo como *las funciones que se desarrollan utilizando la energía como un medio para obtener o facilitar servicios o estados finales*, y alentó la cuantificación y medida de los mismos como temas de incursión y debate para futuras investigaciones (Fell, 2017). En coherencia con lo anterior, Kalt afirma que en ausencia de un concepto unificado de servicio energético, pocos progresos se han realizado en la cuantificación de los mismos (Kalt et al., 2019). Asimismo, Cullen et al. aseguran que para comprender la fotografía completa del uso global de energía, es necesario realizar un seguimiento de los flujos desde los combustibles hasta los servicios finales. El enfoque en todo momento debe estar puesto en los dispositivos de conversión y los sistemas subsiguientes. Esta extensión de la trayectoria de los flujos energéticos se ha descrito cualitativamente, pero hasta la fecha no se ha intentado mapear el flujo total de energía en unidades físicas, desde los combustibles primarios hasta la entrega de servicios finales (Cullen and Allwood, 2010a).

A partir de lo anterior, y entendiendo que el fin último de cualquier sistema energético es suministrar un *servicio energético*, y que dicho servicio energético no necesariamente será una cantidad de energía, sino que será un estado de confort, un servicio determinado; e incluso será subjetivo pues dependerá del contexto socioeconómico, cultural, ambiental, etc.; *se propone formalizar una cuantificación del servicio energético mediante la introducción del concepto de unidad de prestación*. De esta forma, el balance energético abarcaría los flujos desde la fuente primaria hasta la unidad de prestación o cantidad de servicio energético, agregándose uno o dos eslabones más respecto de las metodologías actuales (según de cuál se trate). Al agregar la cuantificación del servicio energético que se está brindando, se habilita un nuevo campo de aplicación e intervención mediante políticas de eficiencia energética, y muy promisorio, pues esta instancia ha sido tradicionalmente poco considerada.

1.4.2. Definición del grado de Acoplamiento entre Calidad de Energía y Exigencia de Servicio Energético

El complemento referido a la segunda limitación deberá considerar la posibilidad de contabilizar la calidad de los flujos energéticos y su degradación en las sucesivas transformaciones. Como se mencionó anteriormente, las metodologías adoptadas actualmente por los países son de primer principio, sin posibilidades de observar y advertir las degradaciones o variaciones de calidad en los flujos (Nakićenović et al., 1996a). Para poder contabilizar las degradaciones sucesivas, entonces se recurre al concepto de *exergía*, como forma de evaluar

la calidad de un determinado flujo energético. La *exergía* se define como *el máximo trabajo teórico obtenible si un sistema S es llevado al equilibrio termodinámico con el ambiente a través de procesos en los que S sólo interacciona con el ambiente* (Sciubba and Wall, 2007). En los últimos años, el análisis exergético clásico descrito por Kotas (Kotas, 1980a, 1980b), Moran y Sciubba (Moran and Sciubba, 1994) fue extendido en términos espaciales y temporales a los fines de considerar las distintas contribuciones de recursos (Stougie and Kooi, 2011). La exergía es una variable termodinámica que presenta dos grandes ventajas para el análisis de sistemas:

- Permite medir la conversión de flujos de masa y energía en términos comparables sobre la base de la capacidad de dichos flujos de producir trabajo mecánico como un efecto útil y deseable.
- Permite identificar y cuantificar las ineficiencias termodinámicas de procesos genéricos a través de la destrucción de la misma exergía.

Por estas dos cualidades la exergía se ha erigido como la herramienta más apropiada para calcular el consumo de recursos a nivel global por parte de sistemas energéticos y cualquier otro tipo de sistema (Rocco et al., 2014a).

A partir de lo anterior, se *propondrá un Análisis Exergético en el sector de usos finales* a los efectos de poder evaluar la calidad de la energía secundaria utilizada y su degradación en los distintos procesos que conforman el uso final de la misma hasta llegar a convertirse en calor (forma final de toda energía), pero, obteniéndose como utilidad el servicio energético pretendido. Asimismo, los distintos usos serán caracterizados por su nivel de *exigencia de calidad* de forma de poder establecer relaciones entre la calidad del energético que se utiliza y la exigencia de la necesidad que se satisface, lo que podría llamarse *acoplamiento de calidad y exigencia*.

1.4.3. Cuantificación del Impacto Global de Intervenciones en Usos Finales mediante el Análisis Input-Output

El desarrollo de una opción metodológica que logre complementar la nula interrelación entre los sectores económicos de las actuales metodologías de balance energético se constituye *como esencial* a los fines últimos del presente trabajo. Las dos primeras propuestas de mejora sólo están relacionadas a obtener y sistematizar información sobre los consumos de energía, mientras que esta mejora implica ir hacia atrás en la cadena energética e involucrar a todos los sectores económicos, no solamente mediante sus vinculaciones de flujos de energía sino también mediante flujos de bienes y servicios. Sólo involucrando a todos los sectores productivos y sectores de consumo, se podrán detectar los reales impactos globales en consumo de energía primaria ocasionados por intervenciones de eficiencia energética en usos finales. Así, el ahorro de energía secundaria que ocasione una intervención de eficiencia energética, generará un mayor consumo en el sector encargado de producir bienes y servicios necesarios para dichas mejoras. La evaluación de los impactos globales de políticas de eficiencia energética en usos finales requiere la integración de los balances energéticos extendidos con modelos capaces de observar las interacciones entre los sectores productivos y los sectores de consumo. El Análisis Input-Output, es ampliamente reconocido por la literatura científica, como

el marco conceptual apropiado para lograr dicho objetivo (Wood et al., 2009). Se *formalizará entonces una metodología para estudiar las variaciones en el consumo global de energía primaria producto de la aplicación de intervenciones de eficiencia energética en usos finales* capaz de contabilizar efectos directos e indirectos.

1.5. Aplicabilidad de la Metodología Propuesta

Planteados los tres aspectos deficitarios de las metodologías de balances energéticos tradicionales y las propuestas para subsanar dichas limitaciones, resulta importante hacer una mención respecto del potencial de *aplicabilidad* de la metodología propuesta.

En aras de lograr la transferencia a las autoridades energéticas (i.e. la aplicación de la metodología para la elaboración de políticas públicas), la metodología propuesta puede implementarse con *datos ya disponibles* en los sistemas de estadísticas energéticas estándares y los sistemas de cuentas nacionales. De poca utilidad serían metodologías que no puedan nutrirse de datos existentes y necesiten estudios de campo o elaborar datos *ad hoc* para poder implementarse. Este hecho constituiría una importante barrera para la difusión y adopción de las mismas. Asimismo, así como en un Sistema de Gestión de la Energía se definen *alcance y límite* (International Organisation for Standardization, 2011), los procedimientos complementarios a las limitaciones primera y segunda, pueden aplicarse según el límite y el alcance que cada autoridad energética defina, por lo que la aplicabilidad de dicha parte de la metodología estaría garantizada de forma total o parcial, sin importar el nivel de detalle de los datos de base con los que se cuente. Luego la implementación de la tercera parte sí debe hacerse a nivel nacional pues los datos para la construcción del modelo Input-Output existen a escala nacional. Respecto de las primeras dos partes, a mayor nivel de detalle y precisión en los datos utilizados, mejores serán los indicadores y resultados que se puedan obtener. Aun así, incluso considerando una eventual desigualdad en la calidad y detalle de los datos utilizados según el uso, sector, localización o vector energético del que se trate, la metodología podría aplicarse de todos modos y tener distintas calidades de resultados según la calidad de los datos utilizados para los diferentes usos, sectores o vectores energéticos involucrados.

Las posibilidades de *comparar* resultados de distintas implementaciones de la metodología en diversos países o regiones es otra característica distintiva e importante en aras de la aplicabilidad de la misma. La condición de *comparabilidad* también está garantizada siempre que se utilicen datos de base que sean capturados o elaborados según los mismos procedimientos, o que de haber diferencias entre ellos existan ajustes que permitan asimilarlos. Es una tendencia mundial en los sistemas de estadísticas energéticas y cuentas nacionales la convergencia en sus procedimientos y metodologías de recolección y elaboración de datos. A partir de esto, si la metodología se aplica con datos de sistemas nacionales obtenidos según procedimientos estandarizados a nivel global, entonces los resultados del método propuesto también podrán compararse entre distintos países o ámbitos de aplicación.

2. Revisión Bibliográfica y Marco Teórico-Conceptual

En el presente Capítulo, se presenta el andamiaje teórico-conceptual relativo a los cuatro argumentos o temáticas sobre los cuales se cimienta la metodología propuesta en el Capítulo 3. En primer lugar se revisan las distintas metodologías tradicionales de balances energéticos, puesto que es lo que se desea complementar; en segundo lugar se analizan los indicadores de eficiencia energética adoptados actualmente y se aborda en profundidad el concepto de servicio energético; luego se incursiona en el concepto de exergía y sus aplicaciones para estudiar la degradación de sistemas y finalmente se presenta un breve resumen sobre los métodos de cuantificación y contabilización de recursos, en especial los basados en el Análisis Input-Output. En todos los casos, se presenta una breve revisión de la bibliografía especializada y literatura científica con el objetivo de extraer los elementos teórico-conceptuales necesarios para poder estructurar la formulación posterior, brindando las referencias para un análisis más profundo y detallado de los argumentos.

2.1. Metodologías de Balances Energéticos actualmente utilizadas

Un balance energético es el punto de partida natural para estudiar la evolución del mercado energético local, hacer pronósticos de demanda, y monitorear el impacto de las políticas públicas relacionadas (International Energy Agency, 2018a). Se constituye como una herramienta fundamental para la planificación global energética, pues permite visualizar cómo se produce la energía, las importaciones y exportaciones, cómo se transforma y finalmente cómo se consume por parte de los distintos sectores económicos (Ministerio de Desarrollo Productivo, 2018; Ministerio de Energía y Minería, 2017).

Un balance energético es el conjunto de relaciones de equilibrio que contabilizan los flujos de energía a través de distintos eventos, desde su producción hasta su consumo final. Esta contabilización se lleva a cabo para un determinado territorio (generalmente nacional) y para un año determinado. Para que sean posibles las comparaciones entre los flujos de diferentes fuentes, se convierten todas las unidades a una medida común. Por este motivo, se convierten los flujos de materia a flujos calóricos a través de sus correspondientes poderes caloríficos como factores de conversión. En términos generales la estructura de un balance energético es *descendente*, compuesto por tres grandes bloques: *producción primaria*, *transformación* y *consumo*, según se observa en la Figura 1. La oferta total de energía primaria (*TPES – total primary energy supply - por sus siglas en inglés*) constituye la entrada total de energía al sistema y el consumo final total (*TFC – total final consumption - por sus siglas en inglés*) constituye el flujo total de energía que entra a los sectores de consumo.

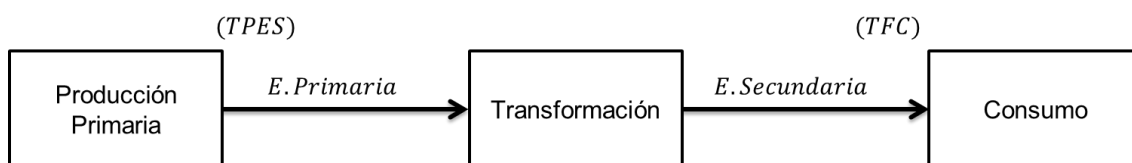


Figura 1: Estructura general de un balance energético.

Se presentan a continuación las características de las dos clases principales de balances energéticos: los *balances de energía neta* y los *balances de energía útil*. No se ahonda en las especificidades metodológicas y procedimentales asociadas a la confección de los mismos, que incluso dentro de cada clase difieren, sino que se atiende exclusivamente a observar y evidenciar las diferencias en la información que cada clase de balance energético proporciona. Previamente, se presentan las definiciones de energía primaria y energía secundaria (o vector energético), dada la importancia de las mismas a los fines del presente (Ministerio de Energía y Minería, 2016).

- *Energía primaria:* son las fuentes de energía en estado propio que se extraen de los recursos naturales de manera directa, como el caso de la energía hidráulica, eólica y solar; mediante un proceso de prospección, exploración y explotación, como el caso del petróleo y el gas natural, o bien mediante recolección, como el caso de la leña. En algunos casos (e.g. leña) la energía primaria se consume directamente sin mediar un proceso de transformación trabajo
- *Energía secundaria (o vector energético):* son las diferentes fuentes de energía producidas a partir de energías primarias (o de otras energías secundarias) en los distintos centros de transformación para poder ser consumidas de acuerdo con las tecnologías empleadas en los sectores de consumo. Las formas de energía secundaria pueden resumirse en electricidad (producida de fuentes primarias o secundarias), gas distribuido por redes, gas licuado de petróleo, naftas, y demás productos de refinerías.

2.1.1. Balances de Energía Neta

Un balance de energía neta contabiliza todos los flujos energéticos que constituyen la oferta total de energía primaria (TPES) (e.g. producción, importación, variaciones de stock, etc.) hasta el consumo final de energías secundarias (TFC). Los mismos se construyen con datos de registro, es decir aquellos datos propiciados a la autoridad energética por parte de las empresas productoras, transportistas y distribuidoras de los distintos energéticos (Organización Lationamericana de Energía, 2011), por lo tanto sólo se reflejan los flujos comerciales de energía. La estructura básica de este tipo de balances se muestra en la Figura 2.

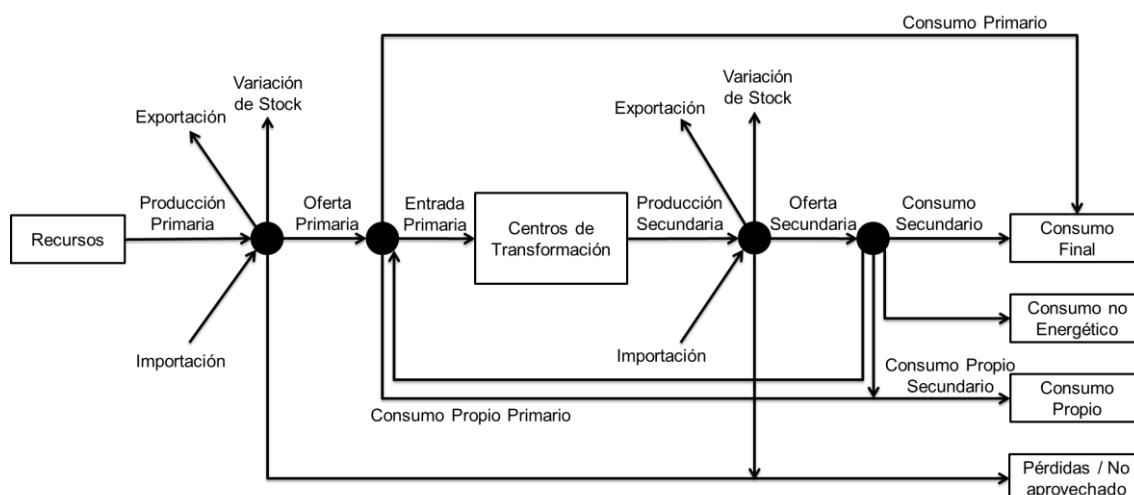


Figura 2: Estructura de un balance de energía neta (Ministerio de Energía y Minería, 2016).

Los sectores de producción son todos aquellos encargados de extracción de recursos fósiles o de aprovechamiento de flujos de energía (i.e. solar, hídrica, eólica). Los sectores de transformación son los que convierten energías primarias en secundaria en un primer caso, y luego energías secundarias en otras energías secundarias (e.g. refinerías, centrales de tratamiento de gas, centrales térmicas). Finalmente, los sectores de consumo son los que compran energía y le dan el uso final a la misma. Los sectores de consumo se dividen en cinco categorías según se observa en la Tabla 2. La división de los sectores de consumo responde a la necesidad de agrupamiento bajo características de consumo análogas dentro de cada categoría, tanto en el tipo de energías secundarias consumidas como en los procesos para los que dicha energía se consume (United Nations Statistics Division, 2011).

Tabla 2: Sectores de consumo final en balances de energía neta.

Sectores de consumo final de energía
Residencial
Comercial, público y servicios
Transporte
Agropecuario
Industrial

Estos balances están concebidos *desde la oferta*, o sea con un enfoque descendente. Asimismo, el ingreso al sistema es un energético que fue *producido o importado* y la salida del sistema es un energético que fue *entregado*, analizándose sólo los procesos de transformación que se llevan a cabo entre lo producido o importado y lo entregado. Esencialmente, se observa en los mismos una perspectiva desde el punto de vista de la *comercialización*, habiendo sido dicho propósito la génesis del desarrollo de la metodología. Esta

perspectiva estaba fundada por un lado en la posibilidad de recolección de datos pero también en una lógica de *abastecimiento, seguridad y escasez* (Organización Latinoamericana de Energía, 2017).

En lo que respecta a la información que se brinda sobre el consumo, este tipo de balances presenta las siguientes carencias:

- No se observa para qué se utiliza la energía (e.g. cocción, fuerza motriz, conservación de alimentos, iluminación, calefacción, etc.).
- No se observan las características de los procesos de conversión de dicha energía para cada finalidad de uso específica (e.g. la eficiencia de conversión de una caldera no se puede detectar).
- No se observa el grado de satisfacción o el nivel de beneficio que se obtiene a partir de ella (e.g. no se puede observar si una persona logró el confort térmico pretendido).

2.1.2. Balances de Energía Útil

Los balances de energía útil, complementan a los balances de energía neta explorando en parte el consumo final logrando agregar una etapa más en la cadena. Los mismos, contabilizan los flujos energéticos desde el suministro primario hasta la *energía útil* recuperada por el consumidor final a la salida de los equipos de consumo, según se muestra en la Figura 3. Desde la oferta de energía primaria hasta el consumo de energías secundarias se condicen exactamente con los balances de energía neta, agregando sólo una instancia más al final de los mismos.

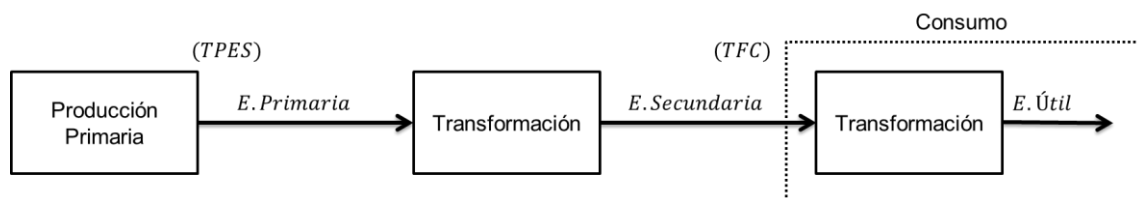


Figura 3: Estructura de balance de energía útil.

La forma de energía que se agrega al análisis en este tipo de balances es la llamada *energía útil*. El concepto de energía útil tiene distintas acepciones según la bibliografía o la metodología específica que se consulte. En su forma más rudimentaria y simple se entiende por *energía útil* a la forma final de la energía a partir de la cual se provee un servicio (e.g. luz, calor, movimiento, fuerza motriz, etc.). Otra definición declara que es la forma *apta para el uso que requiere el consumidor*. Naciones Unidas define la energía útil como *la energía que dispone el consumidor luego de su última conversión* (United Nations Statistics Division, 2011). La Organización Latinoamericana de la Energía, en cambio, la define como *aquella energía que se encuentra disponible luego del sistema de uso para la producción de un bien o servicio, una vez descontadas las pérdidas de transformación y transporte asociadas al mismo* (Organización Latinoamericana de Energía, 2017).

Los balances de energía útil muestran las *pérdidas e ineficiencias totales del sistema*, no sólo del lado de la oferta sino también en el consumo. Así, estos balances exponen toda la cadena energética desde la energía primaria, pasando por los centros de transformación, transporte y distribución, hasta llegar al consumo final, en donde se convierte en *energía útil* para proveer algún servicio (Organización Lationamericana de Energía, 2017). La instancia final de un balance de energía útil, son entonces las formas útiles de energía (e.g. iluminación, calor, movimiento, etc.) y se agruparán en *distintos usos*. Como ejemplo de un esquema de categorización de usos finales se puede observar la Tabla 3 para los sectores industriales y residenciales.

Tabla 3: Categorías de usos en balances de energía útil.

Usos residenciales	Usos industriales
Calefacción de ambientes	Calor directo
Refrigeración de ambientes	Calor de proceso
Producción de agua caliente sanitaria	Fuerza motriz
Cocción	Bombeo
Conservación de alimentos	
Entretenimiento	

Los balances de energía útil han cobrado especial relevancia en las últimas décadas, ya que aún de forma mejorable, permiten dar un paso más en el estudio de la demanda de energía. Políticas de eficiencia energética ampliamente implementadas en los últimos años, como por ejemplo estándares mínimos de eficiencia de equipamiento residencial e industrial (e.g. gasodomésticos, electrodomésticos, sistemas de iluminación), necesitan como insumo esencial para su diseño contar con la información de la última transformación de energía secundaria en energía útil provista por balances de energía útil. Sin ellos, estas políticas no hubieran podido ser implementadas de forma adecuada. La Organización Latinoamericana de Energía promueve desde hace décadas este tipo de balances, afirmando que los conceptos de eficiencia energética, el reemplazo de fuentes de energía, el análisis y proyección de la demanda de energía requieren un conocimiento, no sólo del consumo por sectores económicos, y por fuentes energéticas, sino por subsectores, por categorías de uso y además con información sobre los equipamientos de uso final y su eficiencia (Organización Lationamericana de Energía, 2017).

Un aspecto interesante a considerar en este tipo de balances, a diferencia de los balances de energía neta, es que *no pueden confeccionarse íntegramente con datos de registro*, pues es necesario estudiar en profundidad el sector de consumo y conocer las simples transacciones comerciales no basta para ello. Para lograr esto, se recurre generalmente a encuestas de usos de energía. Estas encuestas demandan vastos recursos económicos para las autoridades energéticas y fundamentalmente para los organismos oficiales de estadísticas. En general, las encuestas energéticas dedicadas son el mejor instrumento para entender el uso de la energía en el consumo final, el monitoreo del impacto de políticas energéticas y reconocimiento de los

potenciales de mejora en la eficiencia energética y viabilidad de futuros programas (United Nations Statistics Division, 2011).

A modo de conclusión, a diferencia de los balances de energía neta, en donde se advirtieron tres carencias, en los balances de energía útil las dos primeras carencias detectadas anteriormente son salvadas, mientras que la tercera aún queda sin mejora alguna. Es decir, en la información brindada por los balances de energía útil:

- Se observa para qué se utiliza la energía (e.g. cocción, fuerza motriz, conservación de alimentos, iluminación, calefacción, etc.).
- Se observan las características de los procesos de conversión de dicha energía para cada finalidad específica (e.g. la eficiencia de conversión de una caldera no se puede detectar).
- No se observa el grado de satisfacción o el nivel de beneficio que se obtiene a partir de ella (e.g. no se puede observar si una persona logró el confort térmico pretendido).

2.2. Eficiencia Energética, Indicadores de Eficiencia Energética, Servicio Energético

La eficiencia energética se ha consolidado en los últimos años como un nuevo paradigma en el estudio de sistemas energéticos, y sobre dicho concepto descansan grandes expectativas en cuanto a las posibilidades de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, el paradigma de consumo eficiente emerge también como un nuevo modelo de consumo que lentamente se incorpora en las estructuras socioeconómicas.

En esta Sección se presenta una revisión del concepto de *eficiencia energética*, los distintos *indicadores* presentes en la literatura asociados a la misma, y los indicadores de eficiencia energética actualmente utilizados para reflejar el comportamiento de los distintos sectores de consumo en diferentes países y economías. Luego, se expone una crítica sobre los mismos destacando sus bondades, pero al mismo tiempo evidenciando su imposibilidad de reflejar la verdadera utilidad del consumo de energía, haciendo necesaria la incursión del concepto de *servicio energético* para avanzar en indicadores que sí reflejen la verdadera eficiencia de los sistemas energéticos. Finalmente, se profundiza en el concepto de servicio energético y se justifica la adopción del mismo como parte esencial de la formulación que se presentará en el Capítulo 3.

2.2.1. Definición de Eficiencia Energética

Por eficiencia energética se entiende a la relación entre la utilidad o beneficios obtenidos y la energía utilizada para ello. Irrek y Thomas distinguen diferentes niveles y perspectivas referidas al concepto de eficiencia energética: macroeconómico, conversión de la energía entre el suministro y la provisión, uso final en los sectores de demanda, y los esfuerzos humanos en la producción doméstica en una economía solidaria (Irrek

y Thomas, 2008). Oikonomu et al. definen la eficiencia energética como la relación técnica entre la entrada de energía y la salida de servicios, que pueden ser modificados con mejoras tecnológicas (i.e. sustitución de tecnología). A su vez, diferencia el concepto de eficiencia energética del de ahorro energético, asociando este último al comportamiento humano (Oikonomou et al., 2009).

2.2.2. Indicadores de Eficiencia Energética

La eficiencia energética debe ser cuantificada a los fines de poder introducirse en el análisis de sistemas energéticos, y en especial en el estudio de los consumos finales de energía. La cuantificación del nivel de eficiencia energética de un proceso, un conjunto de procesos, un consumo o incluso una economía viene dada por el valor que adopten determinados indicadores definidos a tales fines.

Patterson define una serie de indicadores utilizados para medir la eficiencia energética desde una perspectiva física y económica, enfocándose en el consumo de energía causado por cada segmento de la economía. Luego, concluye que más atención debe prestarse al concepto de eficiencia energética por parte de quienes analizan políticas públicas (Patterson, 1996). Tanaka explora diferentes formas de medir o determinar la eficiencia energética, como ser: consumo absoluto de energía, intensidad energética, la difusión de una específica tecnología de ahorro energético o eficiencia térmica (Tanaka, 2008). Haas define indicadores de eficiencia energética para el sector residencial considerando factores claves para su normalización y comparación, concluyendo la necesidad de desagregar indicadores y realizar estudios sobre el comportamiento o estilos de vida (Haas, 1997). En la misma línea, Pérez-Lombard et al. analizan los principales problemas metodológicos para la construcción de indicadores de eficiencia energética y proponen una secuencia de acciones para abordar estos problemas de modo ordenado: establecer la calidad del servicio, identificar niveles de agregación en la pirámide de la eficiencia, definir una magnitud para medir consumos y por último *elegir una adecuada magnitud para cuantificar los servicios provistos* (Pérez-Lombard et al., 2013).

El indicador de eficiencia energética más difundido a nivel global es intensidad energética de un país, definido como la energía primaria necesaria para generar una unidad de producto bruto interno (International Energy Agency, 2018a). Poco puede decirse a partir de dicho indicador respecto de por qué el consumo de energía por un sector ha llegado a cierto nivel, qué tan eficiente es el uso, o por qué el consumo varía tanto entre países de características similares (Schipper et al., 2001). En ese sentido, Schipper et al. revisan una serie de indicadores sectoriales y ejemplifican para 14 países basándose en seis sectores de uso de energía. Con el mismo enfoque, la Agencia Internacional de la Energía, presenta un *Análisis de Descomposición* con el objetivo de identificar las causas de las variaciones en la demanda de energía, separando el rol de la actividad y cambios estructurales, de cambios aislados en la intensidad energética ocasionados por la eficiencia energética (International Energy Agency, 2017). Los principales factores se sintetizan en la Tabla 4. La Unión Europea, también adopta dicho marco conceptual la confección de estadísticas de consumo de energía en el sector residencial (European Union, 2013) (Odyssee-Mure, 2009).

Tabla 4: Indicadores de eficiencia energética de la Agencia Internacional de la Energía.

Sector	Uso final / Sub-sector	Actividad	Estructura	Indicador de E.E.
Residencial	Calefacción de ambientes	Población	Área de ambientes / población	Energía corregida por temperatura / área de ambientes
	Producción de agua caliente sanitaria	Población	Vivienda ocupada / población	Energía / vivienda ocupada
	Cocción	Población	Vivienda ocupada / población	Energía / vivienda ocupada
	Refrigeración de ambientes	Población	Área de ambientes / población	Energía corregida por temperatura / área de ambientes
	Iluminación	Población	Área de ambientes / población	Energía / área de ambientes
Transporte de personas	Equipamiento	Población	Stock de equipamiento / población	Energía / equipo
	Autos particulares, ómnibus, trenes, aviación de cabotaje	Pasajeros por kilómetro	% de pasajeros-kilómetro por modo	Energía / pasajero-kilómetro
Transporte de carga	Camiones, trenes, transporte fluvial / Alimentos, textiles, madera, papel y celulosa, química y caucho, metales básicos, maquinaria, transporte, equipamiento, otras manufacturas	Tonelada por kilómetro	% de tonelada-kilómetro por modo	Energía / tonelada-kilómetro
Manufactura		Valor agregado	% de valor agregado	Energía / valor agregado
Servicios	Servicios	Valor agregado	% de valor agregado	Energía / valor agregado
Otras industrias	Agricultura; Construcción	Valor agregado	% de valor agregado	Energía / valor agregado

2.2.3. Crítica a los Indicadores de Eficiencia Energética

Los indicadores propuestos por la Agencia Internacional de la Energía (Tabla 4) merecen ser analizados de manera especial ya que son los indicadores de eficiencia energética que en la práctica se utilizan a nivel mundial. Los mismos si bien se acercan al planteamiento de una relación entre el beneficio obtenido por el uso de energía y la cantidad utilizada para lograrlo, en general fallan en la definición de la prestación, el beneficio o de forma más genérica en el servicio energético que se está proporcionando.

El indicador de eficiencia energética más difundido a nivel global es la *intensidad energética de un país o economía*, que se define como la energía primaria necesaria para generar una unidad de producto bruto interno (International Energy Agency, 2018b). Este indicador brinda información agregada ya que para su cálculo se consideran las necesidades de energía primaria de toda una economía y el producto bruto de la misma durante un año. Aquí, el beneficio o utilidad del uso de la energía es la generación de una unidad de producto bruto. Es un indicador muy agregado por lo que no pone en evidencia las eventuales diferencias

respecto de la eficiencia energética que pudiera existir en las partes componentes del sistema económico y energético que conforman la economía en cuestión.

La intensidad energética de un país es un indicador fácil de calcular, pero claramente presenta limitaciones para poder comparar la eficiencia en el uso de la energía de países con distintos climas, o con economías disímiles en cuanto a la participación de los sectores primarios, secundarios y terciarios. A modo de ejemplo, el indicador no está en grado de comparar un país cuyo producto bruto interno tenga una gran participación del sector manufacturero energo-intensivo con otro país en que el sector predominante de la economía sea el sector financiero que demanda muy poca energía; o de forma análoga un país con clima templado frío respecto de un país con clima tropical. Asimismo, las diferencias entre las extensiones territoriales de los países y las distancias necesarias a cubrir por los sistemas de transportes de mercaderías y personas, otorgan a este indicador un sesgo que nuevamente dificultará la posibilidad de realizar comparaciones sensatas entre países.

Además de las limitaciones mencionadas en el párrafo precedente, referidas a la imposibilidad de comparación entre países, este indicador presenta un gran defecto y es el hecho de que la producción bruta de un país es considerada la utilidad. Es decir, se considera que el efecto útil o beneficio del uso de energía, ergo de recursos, es sencillamente aumentar el producto bruto interno de un país. El indicador PBI no está estrictamente acoplado al grado de desarrollo de un país, y en las últimas décadas está perdiendo relevancia como indicador de bienestar. En cambio, otros indicadores, como el *índice de desarrollo humano (HDI - human developmen index - por sus siglas en inglés)* elaborado por la Organización de las Naciones Unidas están considerándose en muchas otras estadísticas nacionales y paulatinamente debieran también incorporarse a los indicadores energéticos.

Los indicadores propios del sector transporte (e.g. energía por tonelada-kilómetro, energía por pasajero-kilómetro), implícitamente hacen referencia al beneficio del uso de la energía, pues la utilidad en este caso es el transporte de una tonelada de mercadería o de un pasajero a lo largo de un kilómetro. Este indicador no solamente pone en evidencia la eficiencia del motor del vehículo, sino también el factor de carga del mismo, la destreza de quien conduce y la modalidad de conducción, el viento presente en la carretera, el perfil aerodinámico del vehículo, el estado de las rutas, vías, etc. Sin embargo, no discrimina en cuanto a la calidad del servicio: en el caso del transporte de pasajeros hay distancias que hoy en día pueden cubrirse por vía terrestre o aérea, por lo que si se considera el tiempo en que se realiza el traslado entonces las prestaciones del proceso serían distintas. En caso de querer considerar entonces el tiempo empleado en dicho desplazamiento el indicador mencionado estaría incompleto y sería necesario definir otro indicador que bien podría ser la energía utilizada para desplazar una persona una cierta distancia *en un determinado lapso de tiempo*. Incluso podrían incluirse más características del servicio que se está brindando, no sólo el tiempo en que se traslade a un pasajero una cierta distancia, sino que también podría interesar qué condiciones de confort higrotérmico se garantiza a dicho pasajero durante el viaje, o más aún de qué espacio dispone.

En el ámbito industrial, el indicador más difundido es la *intensidad energética*, que puede calcularse de diferentes modos: basada en unidades de valor agregado o en unidades de producto (International Energy

Agency, 2014b). La intensidad energética basada en unidades de valor agregado se define como la energía necesaria para producir una unidad de valor agregado. La intensidad energética por unidad de producto, en cambio, se define como la energía necesaria para la producción de una unidad. En este caso implícitamente se está introduciendo el concepto de beneficio o prestación, que en el caso del sector manufacturero se asume como la producción de un bien. La intensidad energética por unidad de producto, no solamente engloba la eficiencia tecnológica del proceso sino también el contexto en el que se lleva a cabo (e.g. la calificación del operador, el clima, el estado de mantenimiento de las maquinarias, la calidad de las materias primas), lo que lo hace un indicador en cierta medida más integral. Pero, al mismo tiempo, si bien la utilidad en este caso es claramente un producto, en muchas ocasiones las distintas calidades de un producto hacen necesario que se especifique de forma inequívoca alguna de sus características como para poder definir de forma unificada y estandarizada la utilidad o el beneficio de todo el proceso para el que se utilizó energía. Respecto de la comparabilidad de los productos, existen productos fácilmente comparables (e.g. acero, aluminio, plásticos) en donde basta con especificar características intrínsecas del material para haber definido inequívocamente el producto. Pero a la vez, existen productos de difícil comparación (e.g. indumentaria, alimenticia, electrónica, automotriz) en donde la esencia misma de la producción es producir algo distinto de la competencia, por lo que en este caso es muy difícil comparar dichos productos.

En el sector residencial, comercial, público y servicios, los consumos de energía están fuertemente ligados a los edificios en donde se vive o se trabaja, por lo tanto, los niveles de eficiencia energética dependerán fuertemente de dichos edificios, y consecuentemente los indicadores que la caractericen. En lo que respecta a la climatización e iluminación, los indicadores propuestos por la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, 2014b) se refiere comúnmente al consumo de energía del sector residencial por metro cuadrado calefaccionado, refrigerado o iluminado de un edificio, por lo tanto, en este caso la utilidad o beneficio del uso de la energía se adopta como el metro cuadrado de edificio calefaccionado, refrigerado o iluminado. Considerar la utilidad como un metro cuadrado de edificio climatizado o iluminado es muy limitado, por los siguientes motivos entre otros: climatizar no garantiza confort térmico así como iluminar no garantiza confort visual, la energía que se necesita para climatizar depende de la temperatura exterior, la forma del edificio, su nivel de exposición, la calidad de la envolvente térmica y las eventuales ganancias solares que pudieran existir inciden en el nivel de energía necesaria tanto para climatizar como para iluminar, el área climatizada no necesariamente estará ocupada, la temperatura de confort puede variar según el ocupante y lo mismo sucede con el nivel de confort visual pretendido, etc. Uno de los motivos es salvado en el caso de corregir el indicador a través de la temperatura media externa o de los grados día (International Energy Agency, 2014b), pero es una corrección sólo parcial pues no contempla otras características climáticas ni de los edificios que inciden en los balances térmicos y por consiguiente en los consumos de energía para climatización. Básicamente las falencias mencionadas pueden englobarse en la *poca precisión existente en la definición del beneficio o utilidad del uso de la energía*, sin dejar de advertir que cualquier intento en obtener dichas definiciones con precisión involucraría contemplar cuestiones subjetivas y dependientes del contexto climático, cultural, tecnológico y socioeconómico.

Como conclusión, puede afirmarse que los indicadores de eficiencia energética presentan falencias en relación a la imprecisión con que se determinan los beneficios del uso de energía. Esto responde

probablemente a cuestiones *históricas*, pues como se presentó en el Capítulo 1, históricamente los sistemas energéticos se pensaron desde el lado de la oferta y recién en los últimos años se ha dado más importancia y relevancia a los consumos; pero también a cuestiones de *pragmatismo*, pues la definición de la utilidad o beneficio es muy difícil dada la multiplicidad de factores técnicos, culturales, económicos, ambientales y sociales que influyen en la determinación y unificación de los mismos. Incluso, es probable que a nivel de organismos de energía internacionales se *privilegie la posibilidad* de establecer indicadores por parte de los países, en detrimento del rigor y lo exquisito de los mismos, que haría impracticable e imposible su elaboración.

2.2.4. Servicio Energético

La crítica realizada a los indicadores de eficiencia energética actualmente utilizados, ya sea a nivel global como a nivel sectorial presentan como limitación recurrente un gran déficit en la definición del beneficio o utilidad obtenida a partir del uso de la energía. Para avanzar entonces en la definición de mejores indicadores es necesario primero definir los beneficios y la utilidad que se obtienen del uso de la energía y poder *cuantificarlos*, y para ello se recurrirá al concepto de servicio energético, que conforme fue presentado en el Capítulo 1, emerge en la literatura en las últimas décadas.

El concepto de servicio energético no está aún unificado en el campo científico. Fell, revisa los diferentes usos y significados presentes en la literatura, destacando la disparidad de enfoques y acepciones que se vierten sobre el mismo (Fell, 2017). La misma conclusión es obtenida por Kalt et al. luego de relevar el concepto de servicio energético en distintas áreas de la literatura energética (e.g. económica, social, ambiental, tecnológica). Consecuentemente proponen un *marco conceptual en cascada para los servicios energéticos* con el objeto de establecer un entendimiento más consistente respecto de cómo el uso de la energía contribuye al bienestar humano (Kalt et al., 2019).

Las vastas definiciones de servicio energético presentes en la literatura en los últimos años pueden agruparse en tres categorías: (I) aquellas que se refieren a *energía útil* (e.g. calor, trabajo mecánico, iluminación, etc.), ejemplificada en la definición propuesta por Sorrell “*Definimos servicio energético como el trabajo útil obtenido del consumo de energía*” (Sorrell, 2009) ; (II) aquellas que se refieren a cierta *especie de beneficio* tal como lo presenta Modi “*Los servicios energéticos son los beneficios que los vectores energéticos producen en el bienestar humano*” (Modi et al., 2005); y finalmente (III) las que se refieren a los *resultados de la conversión de energía o la combinación del uso de la energía con la tecnología y el modo de uso* según propuso Fouquet “*Los servicios energéticos se refieren a los servicios que son generados a partir del consumo de energía combinado con otras aplicaciones*” (Fouquet, 2018). Para citar algunos ejemplos, Sovacool (grupo I) identifica cómo los servicios energéticos difieren según los sectores y los ingresos, concluyendo que deben reorientarse las políticas de eficiencia energética de manera de intervenir sobre los servicios energéticos (Sovacool, 2011); Cravioto et al. (grupo II) exploran el vínculo de dicho concepto analizando cómo 17 predictores se asocian a seis dimensiones de satisfacción de servicios energéticos en dos grupos de diferente ingreso económico en México (Cravioto et al., 2014). Cullen et al. (grupo III) trazan el flujo global de energía, desde la Fuente primaria

hasta los servicios finales, y se enfocan en los dispositivos técnicos de conversión y *los sistemas de conversión pasivos* en cada cadena energética (Cullen y Allwood, 2010a). La idea de trazar el flujo energético desde la fuente primaria hasta el servicio final fue primeramente explorada por Nakićenović et al. en el principio de los años noventa (Grübler et al., 1999; Nakićenović et al., 1996b; Nakićenović y John, 1991). Ellos, introducen el término servicio energético, definiéndolo como *la provisión de una determinada tarea con menos energía útil (i.e. la salida desde los dispositivos de conversión) sin pérdidas de calidad de servicio*. En esta línea, Flórez-Orrego et al. presentan un análisis exergético y ambiental comparativo del uso de combustibles en vehículos en Brasil, y bajo esta perspectiva consideran al automóvil como un dispositivo utilizado para brindar un *servicio de transporte*, i.e. el movimiento físico de materiales o personas una determinada distancia en cierto tiempo (Flórez-Orrego et al., 2015). A su vez, Mahlia et al. proponen un análisis exergético de sistemas de climatización e iluminación de viviendas en climas tropicales, y del mismo modo la vivienda se entiende en este caso como un dispositivo que brinda el servicio energético de confort térmico (Mahlia et al., 2011).

2.2.5. El servicio Energético cómo Objetivo del Sistema Energético

De lo expuesto en los anteriores párrafos puede concluirse que los sistemas de balances energéticos contabilizan solamente hasta energía neta o hasta energía útil, resultando insuficientes en brindar información respecto de los beneficios que surgen del uso de la energía. Los indicadores de eficiencia energética si bien esbozan algún tipo de prestación otorgada, adolecen del mismo problema, la imposibilidad de definir de forma precisa el beneficio. El servicio energético es el concepto que en la literatura científica se constituye como la forma de designar dichos beneficios y debe considerarse como el fin último del sistema energético, y sobre el mismo, distintos autores ponen en evidencia la necesidad de su unificación y fundamentalmente su cuantificación. El avance en este sentido es una *conditio sine qua non* para poder elaborar indicadores que mejor reflejen la relación entre el beneficio obtenido y la energía utilizada.

2.3. Exergía

La exergía como variable termodinámica capaz de reflejar la calidad de un flujo energético se ha consolidado en las últimas décadas, no sólo para la realización de estudios energéticos sino también aplicado a la conservación de recursos en general.

En esta Sección se presenta una revisión del concepto de *exergía*, su historia y las sucesivas aplicaciones que paulatinamente se fueron extendiendo desde la termodinámica pura hasta llegar a incluir sistemas económicos globales. Luego se presentan de forma muy sintética los fundamentos para la realización de balances exergéticos de procesos, fundamentos sobre los que se basará una parte de la metodología que se propondrá en el Capítulo 3.

2.3.1. Definición de Exergía, Antecedentes y Aplicaciones

La definición actualmente más difundida de la palabra exergía se refiere a la cantidad de trabajo mecánico obtenible cuando cierta materia es llevada al estado de equilibrio termodinámico con el ambiente natural, mediante procesos reversibles, interactuando sólo con el ambiente mencionado (Moran y Sciubba, 1994; Morris y Szargut, 1986). La palabra *exergía* fue concebida inicialmente por Rant en el año 1956 para denotar *capacidad técnica de realizar trabajo*, pero este concepto ya era insinuado por Maxwell y Gibbs en el Siglo XIX (Gaggioli et al., 2002). En la década del 60 en Alemania la función *Arbeitsfähigkeit* (*habilidad para realizar trabajo*) fue utilizada para evaluar procesos de conversión de energía y finalmente en las siguientes dos décadas la palabra fue emergiendo con más fuerza y consolidándose como central en los estudios de sistemas energéticos (Sciubba y Wall, 2007).

Los métodos de análisis exergéticos para sistemas térmicos o para sistemas de transformaciones energéticas puntuales se encuentran muy bien desarrollados en la literatura (Kotas, 1980a, 1980b; Szargut, 1989). Resulta interesante la extensión que a finales de la década del setenta se hizo para abarcar no solamente flujos energéticos sino flujos de materia. Wall (1977) demuestra la importancia del concepto de exergía para analizar sistemas que convierten energía, materia e información en sistemas industriales y a sistemas económicos regionales desarrollando un método de contabilización para todo tipo de flujo de materia y energía en un análisis de la economía sueca, incluyendo la producción de biomasa, alimentos, madera y sus derivados. Análisis exergéticos de sistemas económicos fueron realizados para muchas economías pudiendo citarse como relevantes los casos de Canadá (Rosen, 1992), Estados Unidos (Reistad, 1975) y Noruega (Ertesvåg, 2005; Ertesvåg y Mielnik, 2000). En la década del ochenta, Gaggioli extendió la teoría para abarcar un amplio espectro de sistemas energo-intensivos (Gaggioli et al., 1988). En la misma década Valero y Lozano presentan la *Teoría del Costo Exergético* como una herramienta metodológica para el análisis de sistemas energéticos pudiéndose a partir de una esquematización combustible-producto identificar potenciales ahorros de energía, y asignación de costos para la posterior optimización económica de sistemas (Lozano y Valero, 1993; Valero et al., 1986a, 1986b, 1986c).

Respecto de las aplicaciones del análisis exergéticos a sistemas económicos en general, Rocco et al hacen una interesante descripción de las metodologías que en sentido amplio quedan abarcadas por lo que se denomina *Termoeconomía*, disciplina que surge de combinar los principios de la termodinámica con los métodos de cuantificación de costos de bienes o servicios de una economía (Rocco et al., 2014b). La palabra *Termoeconomía* fue introducida por Evans et al. en la década del sesenta (Evans y Tribus, 1965), pudiéndose citar estudios realizados al respecto en Estados Unidos (El-Sayed y Evans, 1970) y Europa (Brodyansky, V.M., Sorin, M., & Goff, 1994). Sciubba propone el *Análisis Exergético Extendido* (*EEA por sus siglas en inglés*) (Sciubba, 2001), metodología que fue aplicada en los últimos años a economías regionales y nacionales, entre ellas la provincia de Siena en Italia (Sciubba et al., 2003), Reino Unido (Gasparatos et al., 2009) y Nueva Escocia (Bligh y Ismet Ugursal, 2012). Intenta dicha metodología *internalizar* lo que hasta el momento eran externalidades como el trabajo, el capital y los costos de remediación ambiental mediante la asignación de equivalentes exergéticos a cada uno de los tres factores mencionados para una economía dada. Además de una revisión de los distintos métodos según se expresó al principio del párrafo, Rocco et al.

integran el Análisis Exergético con el Análisis Input-Output en lo que denomina Enfoque Input-Output basado en la Exergía (*ExIO por sus siglas en inglés*), combinando la representatividad en la degradación de los recursos brindado por el análisis de exergía con la potencia matemática y el carácter integral del Análisis Input-Output (Rocco et al., 2014b). En la misma línea, resulta un interesante caso práctico la aplicación de la Termoeconomía a una cadena específica del sector energético con una visión integral desde el recurso primario hasta la energía neta es lo que presentan Font de Mora et al. al estudiar la cadena de biocombustibles desde la tierra hasta el tanque de almacenamiento (*land to tank*) (Font de Mora et al., 2012).

En base a lo expuesto en los anteriores párrafos, diferentes metodologías para el estudio de sistemas termodinámicos en general se sustentan en formulaciones exergéticas en vez de energéticas y a la hora de interrelacionar lo puramente energético con la cuantificación de consumo de recursos entran en juego también variables económicas y/o ambientales. Como la exergía representa el *verdadero valor termodinámico* de la energía, puede entonces considerarse un *commodity* y sería entonces la única base racional para asignar valores monetarios o para asignar valores de impacto ambiental. El análisis exergético de un proceso puede observar la degradación en la calidad de los distintos flujos. Es decir, aún en procesos muy eficientes bajo la óptica del primer principio, puede suceder que la degradación de los flujos energéticos a través de ellos sea mucha, comportando esto una *irreversibilidad*, o un aumento de entropía del universo que podría haber sido evitado en muchos casos. Dentro de lo usos residenciales, el calentamiento de ambientes por efecto Joule constituye un caso en donde el rendimiento de primer principio es prácticamente del cien por ciento pues toda la energía eléctrica se convierte en calor y dicho calor es íntegramente entregado al ambiente, pero desde el punto de vista del segundo principio, la exergía inicial se destruye casi completamente.

2.3.2. Balances de Exergía

El Segundo Principio de la Termodinámica complementa y amplía el balance energético habilitando la evaluación del valor termodinámico de un vector energético y las ineficiencias y pérdidas termodinámicas reales del proceso o sistema (Tsatsaronis, 1993).

Un balance exergético se basa en la descomposición de flujos entrantes y salientes de trabajo mecánico, calor y materia. Los flujos salientes se pueden separar en flujos de pérdidas y flujos útiles. Los flujos de pérdida son directamente volcados al ambiente sin ser reciclados ni reutilizados, mientras que los flujos útiles están compuestos por trabajo, calor y materia efectivamente utilizados en procesos subsiguientes. De forma contraria a lo que sucede en los balances de energía, explicados a partir de la primera ley de la termodinámica, los balances de exergía se obtienen a partir de combinar el primer y segundo principio. La Figura 4 muestra un sistema genérico sobre el cual se realiza un balance de exergía, pudiendo el sistema representar cualquier tipo de proceso o conjunto de procesos dispuestos en cascada.

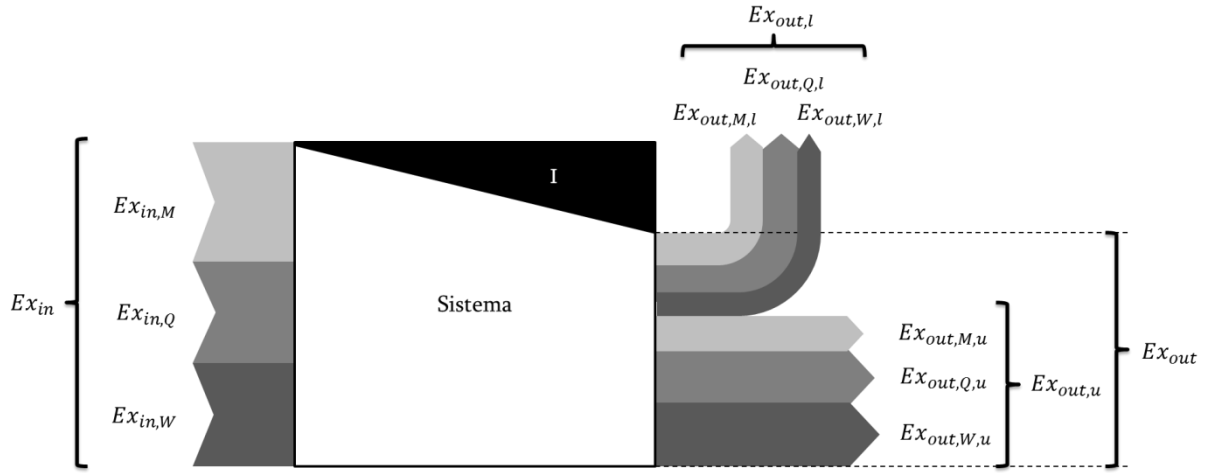


Figura 4: Balance de exergía en un proceso genérico.

De realizarse un balance de energía sobre el sistema de la Figura 4, considerando el mismo como *estacionario*, el balance de primer principio resultaría en la expresión (2.1),

$$H_{M,in} + Q_{in} + W_{in} = H_{M,out} + Q_{out} + W_{out} \quad (2.1)$$

Donde:

$H_{M,in}$ es la entalpía de la masa que ingresa al sistema;

Q_{in} es el calor que ingresa al sistema;

W_{in} es el trabajo mecánico que ingresa al sistema;

$H_{M,out}$ es la entalpía de la masa que sale del sistema;

Q_{out} es el calor que sale del sistema;

W_{out} es el trabajo mecánico que sale del sistema.

El balance exergético incluye un término adicional I habitualmente llamado *pérdida de exergía interna* que refleja la exergía destruida dentro del sistema debido a la *irreversibilidad del proceso*. De hecho, la palabra balance no es la más adecuada en este contexto, pues la exergía no es una magnitud que se conserve, y es necesario recurrir a este término para poder plantear la igualdad de ambos miembros. En función de lo antedicho, puede presentarse el balance de exergía según la expresión (2.2),

$$Ex_{in} = Ex_{out} + I \quad (2.2)$$

donde:

Ex_{in} es la exergía total entrante al sistema;

Ex_{out} es la exergía total saliente del sistema;

I representa la destrucción de exergía interna al sistema.

A su vez, cada exergía total entrante (Ex_{in}) o saliente ($Ex_{out,u} + Ex_l$); estará dada por la suma de las exergías asociadas a los flujos de materia, trabajo y calor; según las expresiones (2.3) y (2.4),

$$Ex_{in} = \sum_{i=1}^{N_{in}} Ex_{in,M,i} + \sum_{i=1}^{M_{in}} Ex_{in,Q,i} + \sum_{i=1}^{L_{in}} Ex_{in,W,i} \quad (2.3)$$

$$Ex_{out} = \sum_{i=1}^{N_{out}} Ex_{out,M,i} + \sum_{i=1}^{M_{out}} Ex_{out,Q,i} + \sum_{i=1}^{L_{out}} Ex_{out,W,i} \quad (2.4)$$

donde:

$Ex_{in,Q,i}$; $Ex_{out,Q,i}$ representan la exergía del i-ésimo flujo de calor entrante al sistema y saliente al sistema respectivamente;

$Ex_{in,W,i}$; $Ex_{out,W,i}$ representan la exergía del i-ésimo trabajo entrante al sistema y saliente al sistema respectivamente;

$Ex_{in,M,i}$; $Ex_{out,M,i}$ representan la exergía del i-ésimo flujo de masa entrante al sistema y saliente al sistema respectivamente;

N_{in} ; N_{out} representan los distintos flujos de materia entrantes y salientes respectivamente;

M_{in} ; M_{out} representan los distintos flujos de calor entrantes y salientes respectivamente;

L_{in} ; L_{out} representan los distintos trabajos entrantes y salientes respectivamente.

Si se reordenan los términos de forma de discriminar entre flujos útiles y flujos de pérdida tal como están discriminados en la Figura 4, entonces la ecuación (2.2) se puede escribir de la forma (2.5)

$$Ex_{in} = Ex_{out,u} + Ex_{out,l} + I \quad (2.5)$$

donde:

$Ex_{out,u}$ representa el flujo exergético útil total ($M + Q + W$) dado por la expresión (2.6),

$$Ex_{out,u} = \sum_{i=1}^{N_{out}} Ex_{out,M,u,i} + \sum_{i=1}^{M_{out}} Ex_{out,Q,u,i} + \sum_{i=1}^{L_{out}} Ex_{out,W,u,i} \quad (2.6)$$

$Ex_{out,l}$ representa el flujo exergético de pérdidas totales ($M + Q + W$) dado por la expresión (2.7)

$$Ex_{out,l} = \sum_{i=1}^{N_{out}} Ex_{out,M,l,i} + \sum_{i=1}^{M_{out}} Ex_{out,Q,l,i} + \sum_{i=1}^{L_{out}} Ex_{out,W,l,i} \quad (2.7)$$

El cálculo de cada uno de los términos excede los objetivos del marco teórico-conceptual necesarios para el presente trabajo, y requiere una importante profundización en termodinámica avanzada según el tipo de proceso que se esté analizando. En el Capítulo 3, en la formalización metodológica se calculará con detalle el término asociado a los flujos calóricos, pues la determinación de los mismos es necesaria a los fines del presente trabajo. Los fundamentos y desarrollos para el cálculo de cada uno de los anteriores términos pueden encontrarse en bibliografía especializada (Bejan, 2016).

Finalmente, la destrucción de energía I , que *representa la irreversibilidad del proceso entendida como la pérdida de capacidad de hacer trabajo mecánico*, se puede evaluar mediante el teorema de Gouy-Stodola (Bejan, 2016), según la expresión (2.8),

$$I = W - W_{rev} = T_0 S_{gen} \quad (2.8)$$

donde:

T_0 es la temperatura de referencia adoptada para el ambiente;

S_{gen} es la generación de entropía dentro del sistema.

Al momento de caracterizar un proceso en términos de la degradación que este genera, la *eficiencia exergética* es probablemente el indicador más representativo y difundido. La eficiencia exergética evalúa el real comportamiento termodinámico de un proceso, definiéndose como *el cociente entre la exergía aprovechada y la exergía utilizada*. Nuevamente, la clara definición de qué se considera aprovechado y qué se considera utilizado se presenta como la principal divergencia en el cálculo de este indicador, y los autores aún no concuerdan en ello (Wall, 1977). Se muestran a continuación tres formas distintas de calcular la eficiencia exergética presentes en la literatura, cuyas diferencias radican en la interpretación que se dé al concepto de exergía aprovechada.

- *Eficiencia exergética simple (η_I)*

Considerando la Figura 5, la eficiencia exergética simple se define según la expresión (2.9) (Cornelissen, 1997),

$$\eta_I = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} = 1 - \frac{I}{Ex_{in}} \quad (2.9)$$

donde:

Ex_{in} es la exergía total entrante, según Figura 5;

Ex_{out} es la exergía total saliente, según Figura 5;

I representa la destrucción de energía interna del proceso, según Figura 5.

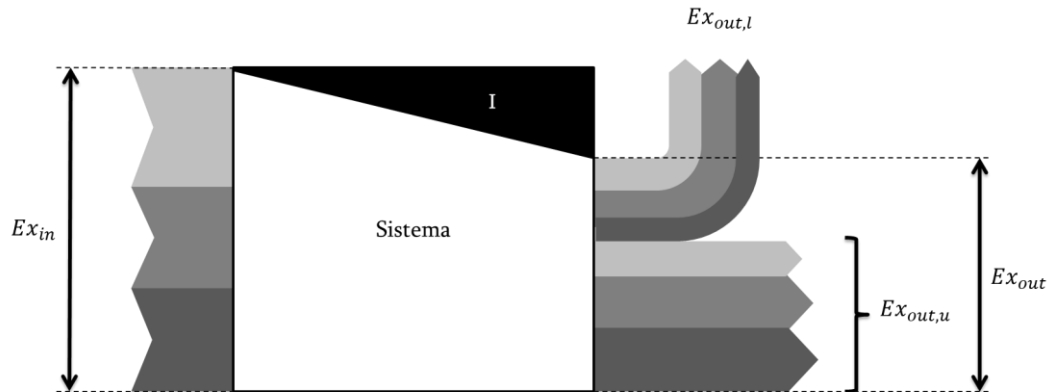


Figura 5: Eficiencia exergética simple.

Esta definición de la eficiencia exergética también se la llama *grado de perfección termodinámica* (Morris y Szargut, 1986; Torres y Gallo, 1998) o *eficiencia universal* (Woudstra et al., 2010), pues lo único que está contabilizando es el grado de irreversibilidad intrínseca del proceso independientemente si las salidas sean útiles para algún fin o no.

- *Eficiencia exergética considerando pérdidas (η_{II})*

Si a la definición anterior (2.9) se le modifica el numerador, de manera de considerar como aprovechada solamente la exergía de los flujos útiles (Figura 6), entonces se tiene la definición de la eficiencia exergética considerando pérdidas, según la expresión (2.10) (Brodyansky, V.M., Sorin, M., & Goff, 1994)

$$\eta_{II} = \frac{Ex_{out,u}}{Ex_{in}} = \frac{Ex_{out} - Ex_{out,l}}{Ex_{in}} = 1 - \frac{I}{Ex_{in}} - \frac{Ex_{out,l}}{Ex_{in}} = \eta_I - \frac{Ex_{out,l}}{Ex_{in}} \quad (2.10)$$

En este caso, a diferencia del anterior, además de evidenciar la destrucción de exergía intrínseca al proceso, también se descuenta la exergía presente en los flujos de pérdida que no se aprovechan.

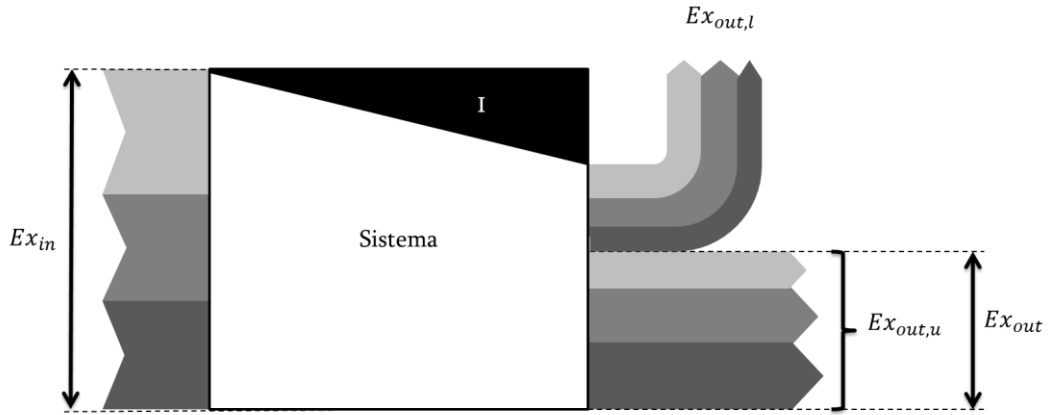


Figura 6: Eficiencia exergética considerando pérdidas.

- *Eficiencia exergética racional (Ψ)*

La eficiencia racional se define como el cociente entre la *exergía deseada u objetivo* respecto de la exergía entrante, según la expresión (2.11) (Kotas, 1980a),

$$\Psi = \frac{Ex_{obj}}{Ex_{in}} \quad (2.11)$$

En donde la exergía objetivo Ex_{obj} se refiere al resultado que se espera sea producido en el sistema y debe determinarse según la función de cada proceso. La adopción de la exergía deseada u objetivo es en gran medida subjetiva y arbitraria, y se presenta nuevamente el problema de *la no inequívoca determinación de la salida de un proceso*. En el caso en que se aplicará en el Capítulo 3 serán las exigencias del servicio energético que se quiere satisfacer a partir de la salida del proceso que se analiza.

A partir de definir la exergía deseada u objetivo, entonces el balance exergético toma la forma de la expresión (2.12),

$$Ex_{in} = Ex_{obj} + I + Ex_{out,l} \quad (2.12)$$

y combinando las dos ecuaciones anteriores, se puede reescribir la eficiencia racional mediante la expresión (2.13).

$$\Psi = 1 - \frac{I + Ex_{out,l}}{Ex_{in}} \quad (2.13)$$

A partir de esta última definición, con una leve modificación, en el Capítulo 3 se presentará una forma de medir el grado de desacople entre la calidad de la energía utilizada y la exigencia de la demanda que se quiere satisfacer.

2.4. Contabilización de Costos Energéticos

Las técnicas de evaluación de costos energéticos como un caso particular de la evaluación de costos ambientales de sistemas se han desarrollado en las últimas décadas, como intento de entender el real impacto de la actividad económica. Dada la interrelación espacio-temporal de los distintos sectores que conforman la actividad económica y la cadena de producción de los distintos bienes y servicios que llegan al consumo, ha sido necesario desarrollar metodologías que puedan contabilizar el impacto directo e indirecto en el consumo de recursos debido a variaciones de demanda de ciertos bienes o servicios, o variaciones en la forma de producir los mismos. En esta Sección, se presenta una revisión de las distintas técnicas de contabilización de costos ambientales, y energéticos en particular. En primer lugar, se hace un sucinto resumen del concepto de Análisis de Ciclo de Vida como forma de concebir el impacto asociado a la producción y consumo de bienes y servicios. Seguidamente, se presentan distintas metodologías: el Análisis de Proceso y el Análisis Input-Output, con mayor foco en este último, pues será el modelo Input-Output el que se utilice en el Capítulo 3 como herramienta para complementar los balances energéticos y poder cuantificar los consumos directos e indirectos de energía primaria necesarios para garantizar una determinada cantidad de servicio energético.

2.4.1. Conceptos Preliminares

Si se considera el servicio energético como beneficio que resulta del uso de la energía, entonces será necesario considerar los costos directos e indirectos asociados a la producción de dicho servicio. Al tratarse de energía, el costo en energía primaria de una energía secundaria específica se obtendría de forma sencilla recorriendo *hacia atrás* la cadena de producción, transformación, transporte y distribución del vector energético considerado. Esta forma de análisis pondría en evidencia los costos directos del servicio energético, pero no los costos indirectos resultantes de proveer de bienes y servicios a toda la cadena energética para garantizar su buen funcionamiento (e.g. en caso de considerar energía eléctrica como el vector energético encargado de proveer el servicio energético cuyo costo se quiere evaluar, yendo aguas arriba en la cadena energética se podrá determinar cuánto gas natural en boca de pozo es necesario para su producción, pero no se estaría cuantificando entre otras cosas la energía necesaria para la producción de acero para los sistemas de transporte). Resulta entonces necesario poder caracterizar todos los procesos que forman parte de la *cadena de suministro (supply chain)* de la energía secundaria considerada. Como primer paso en esta tarea se debe determinar a priori el alcance que se dará al problema planteado definiendo los siguientes aspectos:

- *Recursos considerados*: se refiere a los distintos tipos de recursos que se involucrarán en el estudio. En caso de considerar energía primaria, es necesario definir si se hará referencia a cualquier tipo de energía, o sólo a energía no renovable, de origen fósil, o la energía importada por un país. Además, se pueden incluir otros recursos (e.g. uso de suelo, uso de agua, minerales, emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones de nitróxidos, etc.). Qué tipo de recursos se escogerán para ser considerados en el estudio depende de los objetivos iniciales que se planteen.

- *Delimitación espacial*: se refiere a limitar el estudio al conjunto de procesos que se lleven a cabo dentro de una definida demarcación geográfica.
- *Delimitación temporal*: se refiere a limitar en el tiempo el estudio.

Definiciones Previas

Dado un sistema delimitado en términos espaciales y temporales, se define en él el producto objetivo como la demanda final f_i , producida por un sistema productivo que está compuesto por uno o más procesos productivos, según se observa en la Figura 7 (Rocco et al., 2014b).

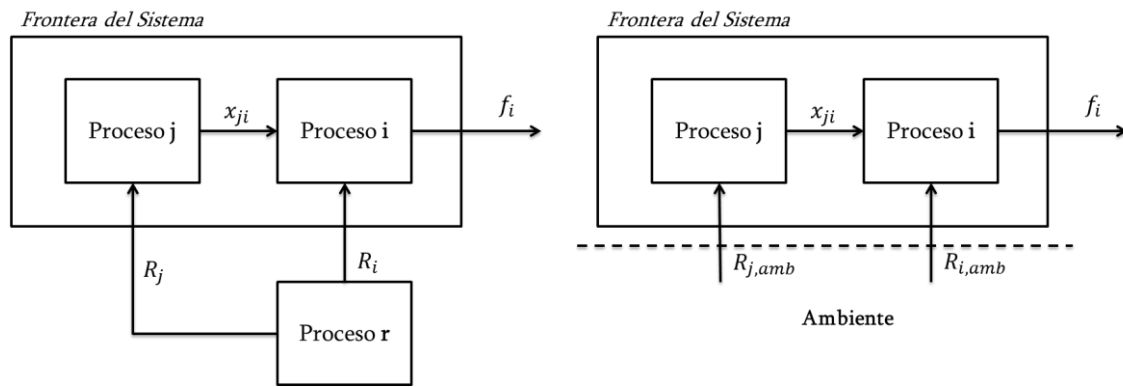


Figura 7: Sistema productivo consumiendo recursos producidos por otros procesos (izquierda) y consumiendo recursos extraídos directamente del ambiente (derecha).

El *producto objetivo* es producido a partir del *Proceso i*, que a su vez utiliza un producto intermedio (x_{ji}) producido en el proceso j . Asimismo el sistema productivo absorbe recursos exógenos R provenientes de otros procesos productivos que no están incluidos en el sistema (Figura 7, izquierda) o tomados directamente desde el ambiente (Figura 7, derecha). Bajo este esquema conceptual, se plantea el interrogante de conocer la cantidad de recursos exógenos necesarios para la producción de la demanda final f_i .

El *consumo de recursos del proceso i*, k_i , se define como la relación entre los recursos exógenos R_i que absorbe dicho proceso para suministrar la demanda final f_i , según la expresión (2.14).

$$k_i = \frac{R_i}{f_i} \quad (2.14)$$

En cambio, el *costo de recursos del proceso i*, c_i , se define como la relación entre los recursos exógenos totales absorbidos directamente R_i e indirectamente R_j por dicho proceso para suministrar una unidad de demanda final f_i , según la expresión (2.15),

$$c_i = \frac{R_i + R_j}{f_i} \quad (2.15)$$

o análogamente, en referencia a la Figura 7 (derecha), se puede escribir también según la expresión (2.16)

$$c_{i,amb} = \frac{R_{i,amb} + R_{j,amb}}{f_i} \quad (2.16)$$

Si bien las anteriores formulaciones podrían parecer sencillas, y de hecho lo son en cuanto a su conceptualización, lo que hace difícil su aplicación es la gran cantidad de procesos interrelacionados entre sí que coexisten para la producción de una unidad de producto objetivo f_i . La determinación de dichos procesos, el grado de interrelación existente entre ellos y el nivel de afectación de los mismos constituyen una ardua tarea.

El Ciclo de Vida

La Sociedad de Toxicología y Química Ambientales definió la *Análisis del Ciclo de Vida* (LCA – *Life Cycle Assessment* - por sus siglas en inglés) como *un proceso para evaluar las descargas ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los materiales y la energía utilizada y los residuos liberados al ambiente; para evaluar el impacto del uso de esos materiales y energía y de las descargas al ambiente; y para identificar y evaluar oportunidades para mejoras ambientales* (Azapagic y Clift, 1999). El Análisis del Ciclo de Vida tiene como característica distintiva respecto de otras metodologías, el análisis de un sistema en todas las etapas de su vida, desde la extracción y procesamiento de las materias primas hasta la disposición final de los productos considerando sus efectos sobre todo el medio ambiente circundante (Guinée et al., 2002; Klöpffer, 1997).

A partir de la formulación del Análisis del Ciclo de Vida, la tarea de contabilización de los recursos primarios asociados a la producción empezó a tener un enfoque sistemático y metodológico en las últimas décadas. La creciente atención hacia los efectos negativos que se producen mediante la utilización de recursos fósiles ha movilizado el análisis de los procesos energéticos hacia una perspectiva más amplia e integral, considerando no sólo los usos directos de recursos fósiles sino también los indirectos. A partir de la década del setenta se empezaron a realizar estudios de esta naturaleza: Chapman et al. estimaron el costo energético primario del cobre, aluminio y combustibles derivados del petróleo (Chapman et al., 1974; Chapman y Faculty, 1975). En forma paralela Bullard y Herendeen realizaron los primeros estudios sobre el costo energético primario de un sistema de producción nacional refiriéndose a los estudios sobre el costo energético de los consumos residenciales de energía en la economía norteamericana (Bullard y Herendeen, 1975).

Distintas formalizaciones de métodos de Análisis de Ciclo de Vida se pueden encontrar en literatura específicamente dedicada a tal fin (Heijungs y Suh, 2002; Hendrickson et al., 2006; Joshi, 1999; Nakamura et al., 2007; Suh y Hupples, 2005). Solamente, y a los fines de una adecuada contextualización de lo que se

postula en el Capítulo 3, se enuncian y describen de forma muy sintética las cuatro fases que componen el marco metodológico para llevar adelante un Análisis de Ciclo de Vida (Azapagic y Clift, 1999):

- *Definición de objetivos y alcance*

Comprende la definición del sistema de estudio considerando al ambiente a partir de un enfoque termodinámico como lo que rodea al sistema de estudio. Se definen la unidad funcional, la demarcación temporal y espacial. Asimismo, se asumen las principales hipótesis y procedimientos de recolección de datos.

- *Análisis de inventario*

Se realizan los balances de energía y masa (residuos, agua, emisiones, etc.) y se cuantifican sus entradas y salidas al sistema a través de la frontera definida en la instancia anterior.

- *Evaluación de impactos*

Una vez compilados los resultados del análisis de inventario, se clasifican dichos valores según categorías preestablecidas de impacto ambiental y se los caracteriza en términos de sus impactos potenciales. En esta instancia se puede formular una función única de impacto como combinación de cada una de las variables de impacto ponderadas con un determinado criterio de valoración.

- *Interpretación de resultados*

En esta fase se identifican soluciones orientadas a mejorar el desempeño del sistema además de la detección de los puntos más sensibles de todo el estudio. Esta etapa suele consistir de un procedimiento de tipo iterativo a los efectos de poder efectivamente evaluar las mejoras propuestas.

2.4.2. Contabilización de Recursos Energéticos: Producción o Consumo

Al momento de contabilizar los recursos exógenos que requiere una economía (e.g. energía, agua, uso de suelo, etc.) o los residuos que sobre el ambiente vierte (e.g. emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos y efluentes, etc.) existen dos modos muy bien diferenciados de hacerlo. Una primera forma consiste en contabilizar los recursos exógenos y los residuos en la etapa de producción, o sea considerar que el consumo de recursos y generación de residuos se lleva a cabo en los sectores de producción de bienes y servicios. Otra forma, en cambio, se basa en considerar el consumo de recursos y la generación de residuos necesaria para la producción de un bien o servicio, y entonces se contabiliza el impacto en el consumo de bienes y servicios. Es decir, el primer enfoque considera los recursos que necesita una actividad productiva en el proceso de producción (e.g. la cantidad de energía que necesita el sector de producción de acero; la cantidad de agua que necesita el sector de producción de plásticos), mientras que el segundo enfoque considera los recursos necesarios en todos los procesos involucrados en la producción de

un determinado bien o servicio (e.g. la energía que fue necesaria para obtener una tonelada de acero; la cantidad de agua que fue necesaria para tener un alimento en góndola). El primer modo se denomina *contabilidad basada en la producción (PBA - production-based accountings - por sus siglas en inglés)*, mientras que el segundo modo se denomina *contabilidad basada en el consumo (CBA - consumption-based accountings - por sus siglas en inglés)*. Se presenta a continuación una somera descripción de las características y aspectos fundamentales de ambos métodos, así como una breve reseña literaria del desarrollo de cada uno de ellos, ventajas y desventajas de los mismos en especial aplicados a la contabilización de recursos energéticos, aunque bien como se mencionó se aplica a todo tipo de recursos y residuos.

- *Contabilidad basada en la producción*

En enfoque PBA contabiliza la oferta total de energía primaria (*TPES*) a partir de sumar la producción de energía primaria del país a partir de distintas fuentes, luego sumar las importaciones/exportaciones, que luego de las pérdidas en las etapas de transformación y de uso propio, llega al consumo por parte de los distintos sectores de consumo final, llamando a esta cantidad consumo final total (*TFC*) (Bullard y Herendeen, 1975). Este enfoque ha sido adoptado para la realización de las estadísticas de consumo y emisión de gases de efecto invernadero por la mayoría de las organizaciones internacionales y se estableció a partir del Protocolo de Kyoto como metodología para determinar las responsabilidades de emisiones de CO₂ (Carson, 1995). Sin embargo, este método está siendo revisado últimamente bajo una visión más integral y *globalizada* de los problemas ambientales. En este sentido, Fujimori y Matsuoka critican el enfoque PBA de la Agencia Internacional de la Energía (Fujimori y Matsuoka, 2011). Jakob et al. muestran las consecuencias de las políticas de control de emisiones basadas en PBA, afirmando que las mismas son las causantes del traslado de industrias contaminantes a países con pocas restricciones ambientales (Jakob et al., 2014).

- *Contabilidad basada en el consumo*

El enfoque CBA, por el contrario, permite contabilizar la energía consumida directa e indirectamente por las actividades industriales de producción de bienes y servicios que se constituirán en productos o servicios para la demanda final (i.e., la energía incorporada en los bienes y servicios). Para poder implementar este enfoque, es necesario basarse en modelos macroeconómicos que permitan ver las interrelaciones entre distintos sectores de producción (e.g. Análisis Input-Output). Recientemente, Afionis et al. hacen una crítica de los dos métodos (PBA y CBA) constatando la relevancia del enfoque CBA para las políticas públicas energéticas, por el hecho de que un enfoque CBA permite entender los *drivers* o *traccionadores* del consumo de energía primaria (Afionis et al., 2017). Si bien el enfoque PBA permite entender el recorrido de los recursos energéticos (i.e. producción, importación y exportación, transformación y pérdidas) no logra poner en evidencia el objeto y el fin último de la utilización de estos recursos, que es el consumo de servicios energéticos. Además, el enfoque PBA, además de haber propiciado la migración de industrias contaminantes desde países desarrollados a países en vías de desarrollo, tampoco toma cuenta que actividades con bajos consumos directos de energía, en realidad pueden tener consumos indirectos muy significativos, por ejemplo, el sector de la construcción (Hong et al., 2016; Liu et al., 2012).

La gran ventaja entonces del enfoque CBA radica en que permite cuantificar la energía embebida en los productos y servicios de consumo final. Como desventaja, depende de la existencia de un modelo macroeconómico calibrado, y además de ello, los límites espaciales para un enfoque CBA debieran ser a escala mundial y por lo tanto para la definición y aplicación de políticas públicas serían necesarios acuerdos mundiales (i.e. la producción de un bien en un país que utiliza directamente los recursos exógenos es exportada y consumida en otro país). Rocco et al. realizan una comparación de los dos enfoques aplicándolos a las economías de Sudáfrica y Botswana, sugiriendo que a las estadísticas actuales bajo un enfoque PBA deba agregarse un análisis CBA, lo que permitiría una mejor definición de políticas de eficiencia energética (Rocco et al., 2018). Los mismos autores, analizando con ambos enfoques 6 regiones mundiales compuestas de 25 sectores, logran inferir que la energía embebida en la producción de bienes y servicios de los sectores de *construcción, educación, salud y otros servicios* es comparable e incluso mayor que la energía embebida en el sector *electricidad, gas y suministro de agua*.

Los dos modos de contabilizar recursos en realidad son necesarios para la realización de políticas públicas orientadas al sector energético, y la adopción de un método u otro debe estar fundado en los objetivos y en lo que se pretende visualizar de los estudios. Por lo tanto, no deben bajo ningún aspecto considerarse enfoques *antagónicos o contrarios* sino *complementarios*. Como en el presente trabajo se pretende cuantificar el recurso energético necesario para producir una cierta cantidad de servicio energético, entonces el enfoque CBA será adoptado en el Capítulo 3, ya que no interesará dónde se produce la energía necesaria para satisfacer esa necesidad, sino dónde se satisface la necesidad (i.e. dónde se brinda el servicio energético).

2.4.3. Análisis de Proceso

El *Análisis de Proceso* (PA – *Process Analysis* - por sus siglas en inglés) fue definido por la Federación Internacional de Institutos para el Estudio Avanzado (IFIAS - *International Federation of Institutes for Advanced Study* – por sus siglas en inglés) en 1978 (International Federation of Institutes for Advanced Studies, 1978) y consiste en *evaluar los requerimientos primarios de energía recorriendo hacia atrás las cadenas de insumos y considerar los recursos tomados del ambiente en cada nivel* según se observa en la Figura 8.

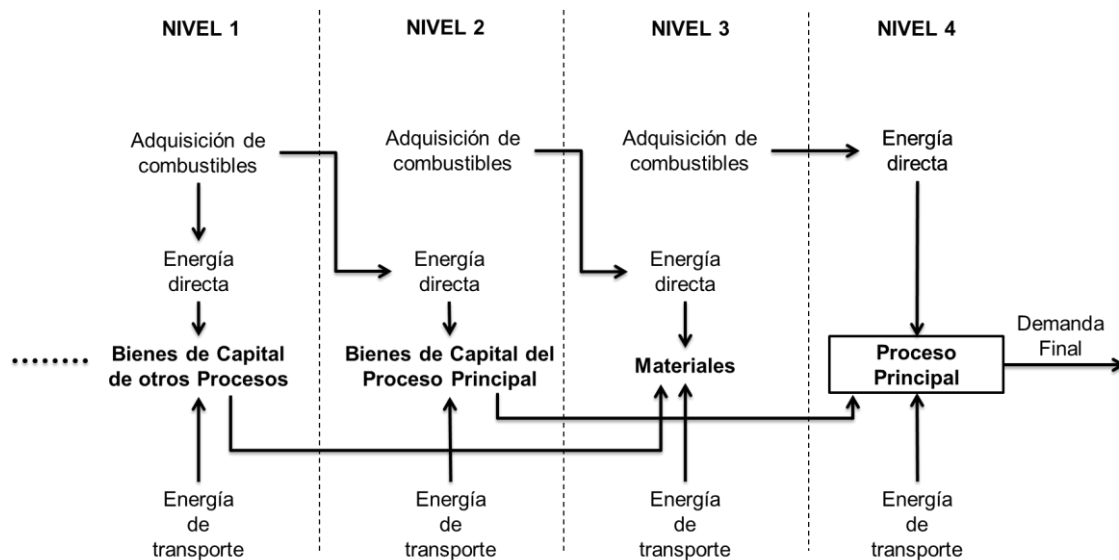


Figura 8: Esquema IFIAS para el Análisis de Proceso.

Para aplicar un análisis de proceso a un sistema genérico como primer paso deben adoptarse las definiciones que se presentaron en el enfoque global de la evaluación del ciclo de vida en cuanto a las delimitaciones del estudio, a saber:

- Definición de la prestación o unidad funcional.
- Definición de los límites temporales y espaciales del estudio.
- Caracterización de cada proceso involucrado.

Luego de estas definiciones previas, debe formalizarse una estructura de tipo árbol en que cada proceso interviniente esté representado, contabilizando la producción total y el consumo total de recursos exógenos. Esta forma de calcular los recursos primarios asociados a la producción de un bien significará una serie geométrica infinita en caso de que existan lazos internos de productos intermedios (Consoli et al., 1993). Como la iteración resultará infinita, será necesario entonces definir un criterio de corte, fundado en que a medida que avanza el número de iteraciones el aporte marginal de cada una resulta cada vez menor.

Los procedimientos para hacer un análisis de proceso pueden ser formalizados matemáticamente mediante la aplicación del álgebra lineal. Considerando un sistema genérico formado por n procesos productivos, los resultados de calcular la producción total x , y el costo total de recursos exógenos C requeridos para la producción de la demanda final f se calculan a partir de las expresiones (2.18) y (2.20), y como se observó previamente la producción total y los costos totales tendrán su componente directa e indirecta según las expresiones (2.17) y (2.19)

$$x = x_D + x_I \quad (2.17)$$

$$x = If + Af + AAf + AAAf + AAAAf + \dots \quad (2.18)$$

$$C = C_D + C_I \quad (2.19)$$

$$C = bIf + b(Af + AAf + AAAf + AAAAf + \dots) \quad (2.20)$$

donde:

x_D representa la producción directa para satisfacer la demanda f ;

x_I representa la producción indirecta para satisfacer la demanda f ;

C_D representa el costo en recursos exógenos directos para satisfacer la demanda f ;

C_I representa el costo en recursos exógenos indirectos para satisfacer la demanda f ;

A es la matriz cuadrada de coeficientes técnicos, en donde cada elemento a_{ij} representa la cantidad de producto i directamente requerido para la producción de una unidad de producto j ;

b es un vector fila en donde cada elemento b_i representa la cantidad de recursos exógenos requerido directamente por el proceso i para producir una unidad de producto

I es la matriz identidad de las mismas dimensiones que la matriz A ;

En los miembros derechos de las ecuaciones (2.18) y (2.20), el primer término se refiere a la producción directa y al costo directo respectivamente, mientras que cada término sucesivo alude a la producción y los costos indirectos de la correspondiente etapa.

2.4.4. Análisis Input-Output

El Análisis Input-Output (*IOA – Input-Output Analysis - por sus siglas en inglés*) como marco analítico conceptual fue desarrollado originalmente por Wassily Leontief sobre finales de la década del 30, con el objetivo de analizar la interdependencia de sectores de una determinada economía. Por la relevancia y el aporte de este trabajo, Leontief recibió el Premio Nobel de Economía en el año 1973 (Dietzenbacher y Lahr, 2004). En términos matemáticos muy generales, un modelo Input-Output consiste en un sistema de ecuaciones lineales, en el que cada ecuación describe la distribución de los bienes y servicios producidos por un determinado sector hacia el resto de la economía.

Si bien el modelo original propuesto por Leontief entendía la interdependencia de sectores sólo en términos económicos y monetarios, en los últimos años la metodología se ha ido extendiendo a otros campos como ser empleo, contabilización de indicadores sociales asociados a la producción, intercambio de bienes y servicios entre distintas regiones y más específicamente en lo que interesa a los fines del presente trabajo, a cuestiones ambientales y energéticas derivadas de las actividades económicas (Minx et al., 2009). Actualmente, el IOA se constituye en un método ampliamente adoptado para el estudio clásico de distintas economías y en el campo del análisis de impacto ambiental (Miller y Blair, 2009; Wood et al., 2009). Su uso para analizar las relaciones entre economía y medio ambiente ha aumentado en los últimos años (Kratena,

2008), consolidándose como un método ampliamente adoptado para el estudio clásico de diferentes economías y el análisis de impacto ambiental (Minx et al., 2009).

En el campo de la energía, el IOA es una herramienta poderosa para dar cuenta de la energía consumida directa e indirectamente por los hogares (i.e., la energía incorporada en bienes y servicios) bajo un enfoque basado en el consumo (Miller y Blair, 2009). Chen y Chen. comparan el IOA con otros dos métodos para el uso de energía urbana en Beijing destacando las diferentes perspectivas y resultados (Chen y Chen, 2015). Otros estudios comparan el CBA basado en IOA con el enfoque PBA para las industrias de China (Liu et al., 2012) y la economía de Sudáfrica (Rocco et al., 2018). Owen et al. contrastan dos modos diferentes de asignación de los recursos energéticos exógenos al aplicar un modelo IO para el Reino Unido (creando el vector de energía extraída o el de energía utilizada), demostrando que los resultados en término de consumo de energía primaria de toda la economía son similares para ambos casos (Owen et al., 2017). Asimismo, el IOA también se adopta para analizar y cuantificar la energía incorporada en el consumo y comercio interregional, pudiéndose mencionar el estudio de la industria de la construcción de China (Hong et al., 2016) y el intercambio de energía embebida en productos y servicios entre distintas regiones de China (Zhang et al., 2015). Rocco et al. formalizan métodos para determinar el flujo de energía embebido en el comercio internacional, y aplican a un caso de estudio a escala mundial utilizando datos del *World Input-Output Database* (Rocco y Colombo, 2016).

Se presenta a continuación una descripción básica de los fundamentos del IOA, atendiendo exclusivamente a explicitar y justificar lo estrictamente necesario para poder formular la tercera parte de la propuesta metodológica que se desarrollará en el Capítulo 3. En primer lugar, se enuncian las hipótesis de un modelo IO, exponiéndose la formulación clásica de Leontief; y luego se detalla el modelo bajo el enfoque producto-industria, ya que la información de base para el caso de aplicación viene dada de esa forma. Para ambas formulaciones del modelo, sea el convencional o el enfoque producto-industria, se expone la forma de calcular el costo en recursos exógenos del sistema, ya sea en términos de la producción de cada sector como del consumo de productos. Para profundizar en la temática del IOA aplicado a cuestiones ambiental se sugiere la lectura complementaria (Gálvez, 2012).

La Matriz Insumo-Producto

La matriz insumo-producto (*IOT – input-output tables - por sus siglas en inglés*) representa en forma matricial el equilibrio sectorial entre la oferta y la utilización de los bienes y servicios de una economía para un período de tiempo dado. Es la forma sintética y sistemática de entender las interrelaciones existentes entre los distintos sectores de la economía. Considerando ciertos supuestos, el estudio de esta matriz permite entre otras cosas analizar y cuantificar los niveles de producción sectorial que satisfacen determinados niveles de consumo e inversión y así poder proyectar las variaciones de producción dado una variación en la demanda.

	Demanda Intermedia de Sectores Productivos	Demanda Final	VBP
Sectores Productivos	Z	f	x
Insumos Primarios	VA		
VBP	x^T		

Figura 9: Matriz insumo producto.

La matriz insumo-producto (Figura 9) consta de 3 matrices (Miller, 2019):

- Matriz de demanda intermedia **Z**: muestra los flujos de compras y ventas entre sectores, resumiendo la actividad intermedia de la economía.
- Matriz de valor agregado **VA**: muestra los pagos sectoriales al capital (excedente bruto de explotación) y al trabajo (remuneración a asalariados) para la transformación de los insumos en productos, además de contabilizar los impuestos y subsidios a la producción
- Matriz de demanda final **f**: muestra los consumos de los hogares, del sector público y la inversión (formación de capital fijo) además de las variaciones de existencias.

A partir de estas 3 matrices, y luego de aplicar los procedimientos establecidos en el modelo IO, se puede obtener la matriz de producción total **x** (o valor bruto de producción VBP). Para la construcción del modelo, es necesario asumir los siguientes supuestos preliminares (Hernández, 2012; Schuschny, 2005):

- *Homogeneidad sectorial*

Cada insumo es suministrado por un solo sector, lo que implica que cada sector produce sólo un producto determinado. Sin embargo, un sector puede utilizar como insumos distintos productos provenientes de otros sectores y diferentes recursos exógenos. En el caso de que un sector produzca distintos tipos de bienes, los mismos deben agruparse.

- *Invarianza de la producción a los precios relativos*

A iguales insumos o productos corresponden iguales precios, es decir que no hay valoración distinta de los productos según quién sea el productor.

- *Oferta de recursos exógenos ilimitados y perfectamente elásticos*

El modelo de Leontief asume que la producción *sigue* a la demanda, es decir es un modelo en que el driver es la demanda, o sea conducido por la demanda. Se asume entonces que los recursos exógenos son infinitos y perfectamente elásticos, es decir no se están considerando restricciones relacionadas a la disponibilidad de recursos.

- *Proporcionalidad*

La cantidad de insumos que necesita un sector para producir varía en la misma proporción en que varía la producción. Esta hipótesis implica que la *tecnología de producción no cambia* en un determinado período de tiempo durante el cual se lleva a cabo el análisis. En la práctica, los *coeficientes técnicos* y *coeficientes de ingreso* tal como se definirán a continuación en el desarrollo del modelo se consideran constantes. Esta es la hipótesis que permite construir un modelo matemático de ecuaciones lineales. De esta hipótesis se desprende que con el modelo que se desarrolla no se podrán explicar los efectos de un aumento en la eficiencia de producción (ya sea eficiencia energética o referida al uso de cualquier otro recurso), pues esto comportaría una modificación de dichos *coeficientes técnicos*.

- *Aditividad.*

El efecto total sobre la producción de varios sectores es igual a la suma de los efectos sobre la producción de cada uno de los sectores. Esta hipótesis es necesaria a los fines de la aplicabilidad del modelo, pues los datos que lo nutran serán los derivados de la matriz insumo-producto (IOT) confeccionada con datos de las cuentas nacionales que en términos generales están muy agregados. En muchos casos incluso, se trabaja con valores agregados que conformen un sector *virtual* nucleando muchos subsectores.

Con estas hipótesis preliminares, entonces puede construirse un modelo muy simplificado de la economía de un determinado país o región, en donde las relaciones se establecen suponiendo *tecnología constante* tanto para la producción de cada sector como en el consumo de cada bien o servicio, lo que garantiza un comportamiento lineal del sistema de ecuaciones resultante del modelo.

Para poder hacer evaluaciones en términos ambientales, es necesario complementar la información que se obtiene de las IOT con información respecto de los usos de recursos exógenos y la generación de residuos a través de las matrices ambientales satélites (*environmental satellite matrix*) (Carson, 1995). Es decir, además de conocer las interrelaciones entre los distintos sectores, el agregado de valor de cada uno y la demanda final para los productos de cada sector, mediante el agregado de las matrices ambientales satélites se puede conocer el uso de recursos y la generación de residuos (i.e. el impacto en el ambiente) de cada sector y por lo tanto del sistema económico en su conjunto. Las dos matrices que consideran los efectos ambientales son:

- Matriz de recursos exógenos **R**: representa las transacciones que se llevan a cabo a través de la frontera del sistema, cuantificando en cada fila de la misma la cantidad de recursos exógenos que son absorbidos por cada sector en forma directa.

- Matriz de emisiones exógenas **W**: representa las transacciones que se llevan a cabo a través de la frontera del sistema, cuantificando en cada fila de la misma las emisiones y los residuos que se emiten por cada sector en forma directa.

Con la incorporación de las dos matrices satélites, el sistema está en grado de *reflejar transacciones ambientales con el exterior*, luego la Figura 9 se transforma en la Figura 10.

	Demanda intermedia de sectores productivos	Demanda final	VBP
Sectores Productivos	Z	f	x
Insumos Primarios	VA		
VBP	x^T		
Recursos Exógenos	R		
Residuos	W		

Figura 10: Extensión de la matriz insumo-producto con la incorporación de matrices ambientales satélites.

Modelo Convencional de Leontief

Tomando como punto de partida la matriz insumo-producto, y considerando las hipótesis anteriormente mencionadas que posibilitan la constitución del modelo IO, se desarrolla a continuación la formulación de los modelos básicos de Leontief, realizando un *balance de producción* (LPM - *Leontief production model* - por sus siglas en inglés) y un *balance de costos* (LCM - *Leontief cost model* - por sus siglas en inglés), considerando en este último caso las matrices de recursos exógenos y residuos. Luego, en base a los balances de producción y de costos se desarrollará el modelo que permite evaluar el impacto en los costos de recursos exógenos ocasionados por una variación en la demanda final de bienes y servicios, o debido a cambios tecnológicos en la forma de producción.

Para desarrollar los balances de producción y costos, se parte de un sistema compuesto de n procesos productivos, que interacciona con el ambiente absorbiendo recursos exógenos y volcando residuos a través de su frontera, según se muestra en la Figura 11.

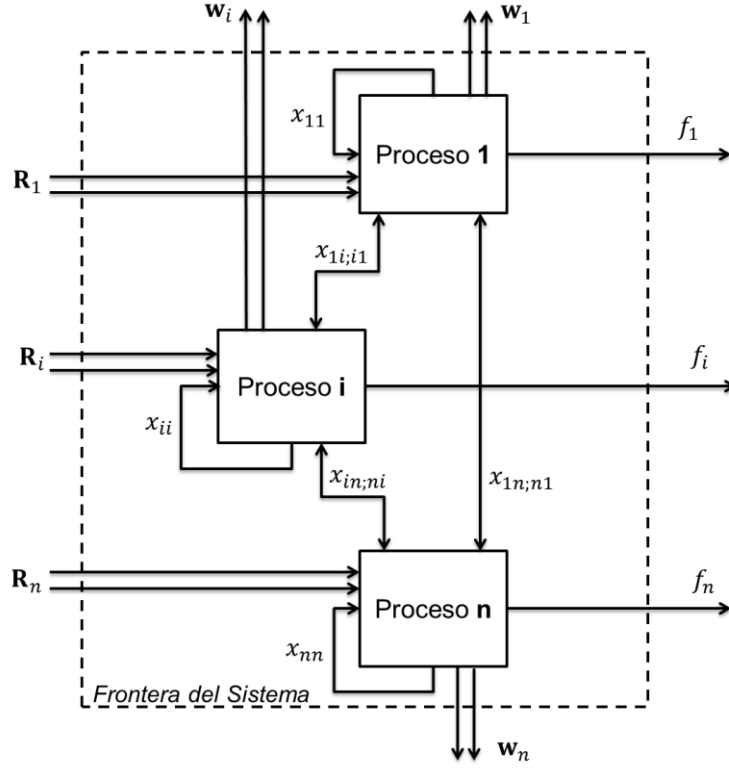


Figura 11: Sistema genérico compuesto por n procesos productivos.

- *Balance de producción (LPM)*

Asumiendo que la economía puede ser categorizada en n sectores, llamando x_i a la producción total del sector i se establece la expresión (2.21) a partir de realizar un balance de producción,

$$x_i = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{ij} + \dots + x_{in} + f_i \quad (2.21)$$

donde:

x_{ij} es la demanda de los bienes y servicios producidos por el sector i por parte del sector j ;

f_i es la demanda final de los bienes y servicios producidos por el sector i .

La expresión (2.21) puede escribirse de forma más compacta agrupando la producción del sector i que va al consumo intermedio dentro del símbolo de sumatoria, obteniéndose la expresión (2.22).

$$x_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} + f_i \quad (2.22)$$

Escribiendo la expresión (2.21) para cada uno de los n sectores se obtiene el sistema de ecuaciones $(n \times n)$ según se muestra en la expresión (2.23),

$$\begin{cases} x_1 = x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1j} + \dots + x_{1n} + f_1 \\ \vdots \\ x_i = x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{ij} + \dots + x_{in} + f_i \\ \vdots \\ x_n = x_{n1} + x_{n2} + \dots + x_{nj} + \dots + x_{nn} + f_n \end{cases} \quad (2.23)$$

que puede escribirse en forma matricial considerando $\mathbf{i}$ como un vector $(n \times 1)$ con todos sus elementos iguales a uno según las expresiones (2.24) y (2.25).

$$\mathbf{x} = \mathbf{Z}\mathbf{i} + \mathbf{f} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Se define la matriz de coeficientes técnicos $\mathbf{A}$ $(n \times n)$, en la que cada elemento a_{ij} es el cociente entre los flujos desde el sector i al sector j y la producción total del sector j según la expresión (2.26).

$$a_{ij} = x_{ij}/x_j \quad (2.26)$$

Y a partir de la matriz $\mathbf{Z}$ y considerando $\hat{\mathbf{x}}$ como la matriz que posee los elementos del vector $\mathbf{x}$ en su diagonal y cero en los demás elementos, entonces la matriz $\mathbf{A}$ queda definida en forma matricial según las expresiones (2.27) y (2.28).

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/x_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1/x_n \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Luego, sustituyendo (2.27) en (2.24) se obtiene la expresión

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}\mathbf{i} + \mathbf{f} \quad (2.29)$$

y considerando que $\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}\mathbf{i}$, finalmente se puede obtener una relación para la producción total de cada sector a partir de la matriz de coeficientes técnicos y la demanda final de los bienes y servicios producidos por cada sector (2.30) .

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (2.30)$$

Luego, despejando $\mathbf{x}$, se obtiene la expresión (2.31),

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{f} \quad (2.31)$$

y llamando $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$, resulta finalmente la expresión (2.32).

$$\mathbf{x} = \mathbf{L}\mathbf{f} \quad (2.32)$$

La matriz $\mathbf{L}$ se llama *matriz inversa de Leontief* o *matriz de requerimientos totales* y representa los requerimientos *directos* e *indirectos* desde el sector j al sector i para proveer una unidad de demanda final (Miller y Blair, 2009).

- *Balance de costos (LCM)*

Para hacer un balance de costos asociado al sistema económico considerado, primero debe caracterizarse a cada sector en términos de los recursos exógenos y las emisiones y residuos que necesita para producir. Se considera el sistema genérico mostrado en la Figura 11, en el cual se absorben del ambiente m tipos distintos de recursos exógenos (e.g. agua, minerales, energía, etc.) y se devuelven s tipos de residuos. Para cada recurso exógeno k , el balance para el sector i expresa el costo total de los productos utilizados como insumos por el i -ésimo sector (i.e. consumo propio y consumos intermedios) además de los recursos directamente utilizados en el proceso de producción i . Esta relación se plasma en la expresión (2.33),

$$c_{ki}x_i = c_{k1}x_{1i} + \dots + c_{kj}x_{ji} + \dots + c_{kn}x_{ni} + R_{ki} \quad (2.33)$$

donde:

- c_{ki} representa el costo total del recurso exógeno k necesario para una unidad de producción del sector i ;
- c_{kj} representa el costo total del recurso exógeno k necesario para una unidad de producción del sector j ;
- R_{ki} representa el recurso exógeno k absorbido directamente por el proceso de producción del sector i .

Luego, del mismo modo que en el desarrollo anterior, la expresión (2.33) puede escribirse de forma compacta agrupando los costos indirectos bajo el símbolo de la sumatoria, según la expresión (2.34),

$$c_{ki}x_i = \sum_{j=1}^N c_{kj}x_{ji} + R_{ki} \quad (2.34)$$

y, haciendo el mismo análisis para cada uno de los n sectores se obtiene el sistema de ecuaciones de $(n \times n)$ de la expresión (2.35).

$$\begin{cases} c_{k1}x_1 = c_{k1}x_{11} + \dots + c_{ki}x_{i1} + \dots + c_{kn}x_{n1} + R_{k1} \\ \vdots \\ c_{ki}x_i = c_{k1}x_{1i} + \dots + c_{ki}x_{ii} + \dots + c_{kn}x_{ni} + R_{ki} \\ \vdots \\ c_{kn}x_n = c_{k1}x_{1n} + \dots + c_{ki}x_{in} + \dots + c_{kn}x_{nn} + R_{kn} \end{cases} \quad (2.35)$$

Los recursos exógenos que *ingresan* al sistema son contabilizados en la matriz $\mathbf{R}$ ($m \times n$) llamada *matriz de recursos exógenos*, representando la misma todas las transacciones que se suceden entre el sistema y el exterior del mismo. Cada fila de la matriz $\mathbf{R}$ representa la cantidad de recursos exógenos absorbido directamente por cada proceso, mientras que cada columna representa los distintos tipos de recursos absorbidos específicamente por el sector i . Cada fila de la matriz $\mathbf{R}$ tendrá distintas unidades en función del recurso del que se trate (e.g. tep, litros de agua, kg, hectáreas de suelo, etc.). A partir de esto, la matriz $\mathbf{R}$ queda definida a partir de la expresión (2.36) o en forma más detallada en (2.37).

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_1 \quad \dots \quad \mathbf{R}_n] \quad (2.36)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & \dots & R_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

A partir del balance (2.22) y del sistema de ecuaciones (2.35) pueden definirse $\mathbf{c}$ ($n \times m$) como la *matriz de costos específico de recursos exógenos* y $\mathbf{C}$ ($n \times m$) como la *matriz de costos totales de recursos exógenos*, según se muestra en las expresiones (2.38) y (2.39) respectivamente.

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Luego, considerando las matrices definidas y partiendo del sistema de ecuaciones que representaba el balance de costos para cada sector (2.35) se puede escribir la expresión matricial (2.40).

$$\hat{\mathbf{x}}\mathbf{c} = \mathbf{Z}^T\mathbf{c} + \mathbf{R}^T \quad (2.40)$$

Para la aplicación del LCM, se debe definir la *matriz de intervención o la matriz de ingreso* $\mathbf{r}$ ($m \times n$), en la que cada elemento r_{kj} representa la cantidad de recurso exógeno k directamente requerido para la producción de una unidad del sector j según la expresión (2.41),

$$r_{kj} = R_{kj}/x_j \quad (2.41)$$

y a partir de la matriz $\mathbf{R}$ y considerando $\hat{\mathbf{x}}$ como ya fuera definida anteriormente, entonces la matriz $\mathbf{r}$ queda definida en forma matricial según la expresión (2.42), y en forma detallada (2.43).

$$\mathbf{r} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & \dots & R_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/x_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1/x_n \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Luego, sustituyendo (2.27) y (2.42) en (2.40) se puede expresar el balance de costos en función de la matriz de coeficientes técnicos $\mathbf{A}$ y la matriz de ingresos $\mathbf{r}$, tal como se observa en la expresión (2.44),

$$\hat{\mathbf{x}}\mathbf{c} = \hat{\mathbf{x}}\mathbf{A}^T\mathbf{c} + \hat{\mathbf{x}}\mathbf{r}^T \quad (2.44)$$

y si se pre-multiplican ambos miembros de la relación anterior por $\hat{\mathbf{x}}^{-1}$ y posteriormente se aplican propiedades básicas del álgebra matricial, se obtiene la expresión (2.45).

$$\mathbf{c} = \mathbf{A}^T\mathbf{c} + \mathbf{r}^T \quad (2.45)$$

A partir de (2.45) y aplicando nuevamente propiedades del álgebra matricial se obtiene el *balance de costos directos e indirectos de los recursos exógenos para satisfacer una unidad de demanda final*, lo que se muestra en la expresión (2.46).

$$\mathbf{c} = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^{-1})^T\mathbf{r}^T \quad (2.46)$$

Si se utiliza la matriz inversa de Leontief en la ecuación anterior y aplicando propiedades de la matriz transpuesta, se obtiene la expresión (2.47).

$$\mathbf{c} = (\mathbf{rL})^T \quad (2.47)$$

Luego, se obtiene el costo total $\mathbf{C}$ para una determinada demanda final $\mathbf{f}$, según las expresiones (2.48) y (2.49).

$$\mathbf{C} = \hat{\mathbf{f}}\mathbf{c} \quad (2.48)$$

$$\mathbf{C} = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{rL})^T \quad (2.49)$$

La matriz $\mathbf{C}$ asigna los recursos exógenos en los bienes y servicios que se suministran a la demanda final, mientras que la matriz $\mathbf{R}$ asigna los recursos al sector productivo que lo usa directamente, es por ello que ambas matrices son distintas. Sin embargo, como el costo es una *magnitud conservativa*, la cantidad total de recursos absorbidos por el sistema será *igual* a la suma de los costos totales de los bienes y servicios que el sistema provee cumpliéndose la siguiente relación (2.50).

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{R}\mathbf{i} = \mathbf{R}_{tot} \\ (\mathbf{i}\mathbf{C})^T = \mathbf{C}_{tot} \end{array} \right\} \mathbf{R}_{tot} = \mathbf{C}_{tot} \quad (2.50)$$

Y si además, los distintos recursos exógenos se miden en las mismas unidades y corresponden a magnitudes *sumables*, entonces también se cumplirá la relación (2.51):

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{i}\mathbf{R}_{tot} = R_{tot} \\ \mathbf{i}\mathbf{C}_{tot} = C_{tot} \end{array} \right\} R_{tot} = C_{tot} \quad (2.51)$$

El mismo análisis realizado con la matriz de recursos exógenos se puede realizar para cuantificar los residuos que el sistema devuelve al ambiente. Definiendo la *matriz de residuos* $\mathbf{W}$ conforme la expresión (2.52) de forma análoga a lo hecho para la matriz de recursos exógenos,

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & \dots & W_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{s1} & \dots & W_{sm} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

y definiendo la *matriz de egresos* $\mathbf{w}$ según la expresión (2.53) de forma análoga a lo hecho con la matriz de ingresos,

$$\mathbf{w} = \mathbf{W}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (2.53)$$

se obtiene también la matriz de costos específicos de residuos (2.54).

$$\mathbf{c} = (\mathbf{w}\mathbf{L})^T \quad (2.54)$$

Finalmente, al igual que en el caso del costo de recursos exógenos, se puede escribir la matriz de costos totales $\mathbf{C}$ de generación de residuos y emisiones para una cierta demanda $\mathbf{f}$ según las expresiones (2.55) y (2.56).

$$\mathbf{C} = \hat{\mathbf{f}}\mathbf{c} \quad (2.55)$$

$$\mathbf{C} = \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{w}\mathbf{L})^T \quad (2.56)$$

- *Evaluación de shocks de demanda y cambios tecnológicos en la producción*

Al ser el modelo IO un modelo lineal, pueden ensayarse variaciones en la demanda final de ciertos bienes y servicios y así poder fácilmente conocer las variaciones en la producción total de cada sector, los recursos exógenos utilizados y los residuos generados. Por otro lado, también se pueden simular variaciones estructurales de los sistemas, como ser cambios en las relaciones de producción entre insumos y productos, por intervenciones de eficiencia, de recambio tecnológico, o de sustitución de insumos. Estas intervenciones

generarán modificaciones en la matriz de coeficientes técnicos, pudiéndose establecer las variaciones en las demás variables antes y después de la intervención.

Para estudiar *el impacto ocasionado por intervenciones en la demanda final* (i.e. shock de demanda), definido el vector *variación de demanda final* $\Delta \mathbf{f}$, el cambio en la *producción total de cada sector* $\Delta \mathbf{x}$ y la variación del costo total de recursos exógenos $\Delta \mathbf{C}$ están dados por las expresiones (2.57) y (2.58) respectivamente.

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{L} \Delta \mathbf{f} \quad (2.57)$$

$$\Delta \mathbf{C} = \Delta \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{rL})^T \quad (2.58)$$

Para evaluar cambios intrínsecos a los procesos productivos, a partir de una nueva matriz inversa de Leontief $\bar{\mathbf{L}}$, podrán determinarse las variaciones en la producción de cada sector como así también las variaciones en los costos ambientales totales, según las expresiones (2.59) y (2.60) respectivamente.

$$\Delta \mathbf{x} = (\bar{\mathbf{L}} - \mathbf{L}) \mathbf{f} \quad (2.59)$$

$$\Delta \mathbf{C} = \hat{\mathbf{f}}[(\mathbf{r}\bar{\mathbf{L}})^T - (\mathbf{rL})^T] \quad (2.60)$$

El Enfoque Producto-Industria

El enfoque producto–industria en un modelo IO es sencillamente una variante del modelo de Leontief convencional, que presenta las siguientes ventajas:

- Permite considerar que una industria produce más de un producto (productos secundarios e intermedios).
- La sistematización y el formato de los datos necesarios para construir el modelo es más *compatible* con la organización de datos de los actuales sistemas de cuentas nacionales (Miller y Blair, 2009).

El enfoque producto–industria fue propuesto en 1968 por las Naciones Unidas como un estándar de recopilación de datos para todos los países miembros y su adopción se ha consolidado a nivel mundial por todos los países, existiendo incluso un protocolo de la Unión Europea basado en los mismos lineamientos (Ruggles, 1995; United Nations, 1968). La característica esencial de este enfoque a diferencia del modelo convencional, es que los distintos sectores utilizan productos para producir otros productos, es decir, los productos pueden ser insumos para producir otros productos o pueden destinarse al consumo final. La información de base para construir un modelo IO bajo el enfoque producto-industria la constituyen los llamados *Cuadros de Oferta y Utilización (SUTs - Supply end Use Tables - por sus siglas en inglés)*. Asimismo, agregando las matrices ambientales satélites, queda estructurada la información que permite desarrollar los balances de producción y los balances de costos, tal como se observa en la Figura 12.

	Productos	Sectores	Demanda final	VBP
Productos		U ($m \times n$)	e	q ($m \times 1$)
Sectores	V ($n \times m$)			x ($n \times 1$)
Insumos Primarios		VA		
VBP	q^T	x^T		

Recursos Exógenos	R ($1 \times n$)
Residuos	W

Figura 12: Cuadros de oferta y utilización con matrices ambientales satélites

A diferencia del modelo IO convencional, en el que la matriz **Z** reunía información de las transacciones entre los distintos sectores, en el enfoque producto–industria se definen relaciones entre sectores y los bienes o servicios que son producidos por dichos sectores, por lo tanto se definen dos matrices que en su conjunto *reemplazan el papel que cumplía la matriz Z* del modelo original. Estas matrices son:

- *Matriz de uso U*: muestra los flujos de compras de los distintos productos por parte de los diferentes sectores económicos.
- *Matriz de producción V*: muestra la producción de los distintos productos por parte de los diferentes sectores económicos.

A su vez, el *vector de demanda final e*, no se referirá a sectores sino a productos, pero su esencia es la misma que en el modelo convencional, mostrando los consumos de los hogares, del sector público y la inversión (formación de capital fijo) además de las variaciones de existencias, de los distintos productos de la economía (Miller y Blair, 2009). Luego la *matriz de valor agregado VA*, la *matriz de recursos exógenos R*, y la matriz de residuos **W**, tienen la misma definición y estructura que en el modelo convencional.

- *Balance de producción (LPM)*

Considerando un sistema genérico compuesto por m productos y n industrias (Figura 12), se define la *matriz de usos U* ($m \times n$), en la cual cada elemento u_{ij} representa las compras que el sector j hace del producto i .

Luego, a partir de la producción total de cada sector $\mathbf{x}$, el equivalente a la matriz ordinaria de coeficientes técnicos será la matriz $\mathbf{B}$ ($m \times n$), definida según la expresión (2.61),

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\hat{\mathbf{x}}^{-1} \quad (2.61)$$

en la que cada elemento b_{ij} representa la cantidad del producto i por unidad monetaria de producción de la industria j , según la expresión (2.62).

$$b_{ij} = u_{ij}/x_j \quad (2.62)$$

La matriz que denota cómo los sectores producen los productos se llama *matriz de producción* $\mathbf{V}$ ($n \times m$). Cada elemento v_{ij} de dicha matriz representa la cantidad de producto j que produce el sector i . Bajo este enfoque, a diferencia del enfoque convencional, deben contabilizarse la producción total de un determinado sector $\mathbf{x}$ ($n \times 1$), y la producción total de un cierto producto ($m \times 1$) por separado. Las expresiones (2.63), (2.64), (2.65) y (2.66) expresan las definiciones para $\mathbf{x}$ y $\mathbf{q}$ respectivamente (en forma desarrollada y en notación compacta).

$$x_j = v_{j1} + \dots + v_{jm} \quad (2.63)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{i} \quad (2.64)$$

$$q_j = v_{1j} + \dots + v_{nj} \quad (2.65)$$

$$\mathbf{q}' = \mathbf{i}'\mathbf{V} \quad (2.66)$$

A su vez (2.66) puede escribirse según la expresión (2.67).

$$\mathbf{q} = \mathbf{V}'\mathbf{i} \quad (2.67)$$

De forma alternativa, partiendo de la Figura 12, puede escribirse cada elemento del vector $\mathbf{q}$ según la expresión (2.68),

$$q_j = u_{j1} + \dots + u_{jn} + e_j \quad (2.68)$$

o, en forma matricial mediante (2.69),

$$\mathbf{q} = \mathbf{U}\mathbf{i} + \mathbf{e} \quad (2.69)$$

donde el vector $\mathbf{e}$ ($m \times 1$) es el vector que demanda final, en donde cada elemento e_j representa la demanda final del producto j .

En el modelo de Leontief convencional se combinan las ecuaciones (2.24) y (2.27) para llegar a escribir la producción total de cada sector en función de la demanda final de cada sector según la expresión (2.32), habiendo considerado la matriz inversa de Leontief $\mathbf{L}$ definida como $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$. Esta ecuación (2.32) pone en evidencia que *la tracción* de la producción de los sectores $\mathbf{x}$ se da por el vector de demanda final $\mathbf{f}$. De forma análoga, en el enfoque producto-industria, combinando las ecuaciones (2.61) y (2.69) se obtiene la expresión (2.71),

$$\mathbf{q} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{e} \quad (2.71)$$

como resultado formalmente análogo al obtenida en el modelo original de Leontief (2.32). A diferencia de la ecuación (2.32), la ecuación (2.71) contiene la producción total de productos $\mathbf{q}$ en el lado izquierdo y la producción total de cada sector en el lado derecho $\mathbf{x}$.

En bibliografía específica (Miller y Blair, 2009) se encuentra un detallado análisis de las posibilidades para avanzar en la constitución del modelo a partir de distintas operaciones algebraicas y con distintas variantes. Sin entrar en esos detalles, se formulará a continuación el desarrollo que permite llegar a una forma de escribir la producción total de productos en función de la demanda final ($\mathbf{q} = f(\mathbf{e})$) y la producción total de cada sector industrial en función de la demanda final ($\mathbf{x} = g(\mathbf{e})$), pues estos son los resultados que se necesitarán en el Capítulo 3.

Se define la *matriz de proporciones de producción* $\mathbf{D}$ ($n \times m$) en la que cada elemento d_{ij} representa la fracción de la producción total del producto j que fue producido por la industria i según la expresión (2.72),

$$d_{ij} = v_{ij}/q_j \quad (2.72)$$

resultando para todo el sistema, la relación matricial de la expresión (2.73).

$$\mathbf{D} = \mathbf{V}\hat{\mathbf{q}}^{-1} \quad (2.73)$$

- *Matriz total de Requerimientos*

Sobre la ecuación (2.73) pueden realizarse operaciones básicas del álgebra matricial, obteniéndose la expresión (2.74),

$$\mathbf{D} = \mathbf{V}\hat{\mathbf{q}}^{-1} \Rightarrow \mathbf{D}\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{V} \Rightarrow \mathbf{D}\hat{\mathbf{q}}\mathbf{i} = \mathbf{V}\mathbf{i} \quad (2.74)$$

y luego, sustituyendo en base a la expresión (2.64), se obtiene la relación entre los vectores $\mathbf{q}$ y $\mathbf{x}$, como se observa en la expresión (2.75),

$$\mathbf{D}\mathbf{q} = \mathbf{x} \quad (2.75)$$

que, en caso de que $\mathbf{D}$ sea cuadrada y no singular puede escribirse de la forma (2.76).

$$\mathbf{q} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{x} \quad (2.76)$$

Luego, la solución al problema de encontrar ($\mathbf{q} = f(\mathbf{e})$) se obtiene introduciendo (2.75) en (2.71), obteniéndose la expresión (2.77),

$$\mathbf{q} = \mathbf{B}(\mathbf{D}\mathbf{q}) + \mathbf{e} = (\mathbf{B}\mathbf{D})\mathbf{q} + \mathbf{e} \quad (2.77)$$

que, luego de despejar $\mathbf{q}$, se transforma en la forma buscada, como se muestra en la expresión (2.78).

$$\mathbf{q} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{D})^{-1}\mathbf{e} \quad (2.78)$$

La matriz $(\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{D})^{-1}$ se llama *matriz de requerimientos totales producto–producto* y se denota $\mathbf{L}_{pp}$. La misma conecta la demanda final de productos con la producción total de los productos. Esta matriz adopta el rol que en el modelo ordinario adoptaba la matriz inversa de Leontief $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$.

Luego, para obtener ($\mathbf{x} = g(\mathbf{e})$), se sustituye (2.75) en (2.78) obteniéndose la forma buscada según la expresión (2.79).

$$\mathbf{x} = [\mathbf{D}(\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{D})^{-1}]\mathbf{e} \quad (2.79)$$

La matriz $[\mathbf{D}(\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{D})]^{-1}$ se llama *matriz de requerimientos totales sector–producto* y conecta la demanda final de los productos con la producción final de los sectores y se llamará en adelante $\mathbf{L}_{pi}$.

Como se mencionó anteriormente, la matriz $\mathbf{B}\mathbf{D}$ cumple el rol de la matriz de coeficientes técnicos $\mathbf{A}$ en el modelo ordinario de Leontief, mostrando los insumos de productos por unidad de valor monetario de producción. Por lo tanto en la matriz $\mathbf{B}\mathbf{D}$ *subyace la hipótesis* de que los insumos para la producción del producto j son promedios ponderados de los insumos para cada sector que produce el producto j , y el peso que se asigna a cada uno es la participación de cada sector a la producción total del producto j . Es decir, todos los productos producidos por un sector se asumen con la misma estructura de insumos, según la columna del sector en la matriz $\mathbf{B}$. Por lo tanto el modelo IO construido se denomina de *tecnología basada en la industria (industry-based technology)*, y suele referirse a la matriz $\mathbf{L}_{pp} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}\mathbf{D})^{-1}$ como la *matriz de requerimientos totales producto–producto con tecnología basada en la industria*. Podría haberse establecido un modelo IO de *tecnología basada en el producto*, pero no se considera necesario detallar sobre dicha hipótesis pues no se necesita para la formulación del Capítulo 3. De todos modos, en bibliografía específica se pueden encontrar los detalles del modelo según dicha hipótesis (Miller y Blair, 2009).

- *Balance de costos (LCM)*

Para evaluar los recursos exógenos, se procede de forma análoga a lo realizado en el balance de costos del modelo convencional de Leontief. Así, considerando la matriz C_{PB} ($m \times n$) como la matriz de los costos totales basada en la producción, la misma se puede obtener a partir de la expresión (2.79),

$$C_{PB} = r(\widehat{L_{PI}}e) = R\hat{x}^{-1}\hat{x} = R \quad (2.79)$$

donde cada elemento $C_{CB,k,i}$ representa el costo del recurso exógeno k total que utiliza el sector i para toda su producción.

Mientras que, para el caso de contabilizar los recursos exógenos primarios basados en los consumos C_{CB} , el cálculo debe realizarse según la expresión (2.80),

$$C_{CB} = rL_{PI}\hat{e} \quad (2.80)$$

donde cada elemento $C_{CB,k,j}$ representa el recurso exógeno k total embebido en la cantidad total de producto j .

De forma análoga a lo que sucede en la asignación de recursos para el modelo ordinario de Leontief, se verifica nuevamente que la suma de los recursos totales que ingresan al sistema, se contabilicen bajo un enfoque PBA o CBA, deberán verificar la expresión (2.81)

$$\begin{aligned} Ri &= R_{tot} \\ C_{PB}i &= C_{PB_{tot}} \\ (iC_{CB})^T &= C_{CB_{tot}} \end{aligned} \quad (2.81)$$

Y si además, los distintos recursos exógenos se miden en las mismas unidades y corresponden a magnitudes *sumables*, entonces también se cumple la relación (2.82),

$$\left. \begin{aligned} iR_{tot} &= R_{tot} \\ C_{PB_{tot}} &= C_{PB_{tot}} \\ C_{CB_{tot}} &= C_{CB_{tot}} \end{aligned} \right\} R_{tot} = C_{CB_{tot}} = C_{PB_{tot}} \quad (2.82)$$

llegando otra vez a la conclusión de que todos los recursos exógenos que ingresan al sistema R_{tot} son iguales a los costos de recursos exógenos contabilizados en los sectores de producción $C_{PB_{tot}}$ y a también a los costos de recursos exógenos totales contabilizados en el consumo $C_{CB_{tot}}$.

El mismo análisis realizado con la matriz de recursos exógenos se puede realizar para cuantificar los residuos.

- *Evaluación de shocks de demanda y cambios tecnológicos en la producción*

Al igual que en el modelo convencional de Leontief, bajo el enfoque producto-industria se podrán estudiar variaciones en la producción y en el costo de recursos exógenos totales debidos a cambios en la demanda final o en las tecnologías de producción de los distintos sectores.

Para estudiar *el impacto ocasionado por intervenciones en la demanda final* (i.e. shock de demanda), definido el vector *variación de demanda final* $\Delta \mathbf{e}$, el cambio en la *producción total de cada sector* $\Delta \mathbf{x}$ y la variación del costo total de recursos exógenos $\Delta \mathbf{C}$ están dados por las expresiones (2.83) y (2.84) respectivamente.

$$\Delta \mathbf{x} = [\mathbf{D}(\mathbf{I} - \mathbf{BD})^{-1}] \Delta \mathbf{e} \quad (2.83)$$

$$\Delta \mathbf{C}_{CB} = \mathbf{r} \mathbf{L}_{PI} \widehat{\Delta \mathbf{e}} \quad (2.84)$$

Para evaluar cambios intrínsecos a los procesos productivos, a partir de una nueva matriz de requerimientos totales sector-producto $\overline{\mathbf{L}_{PI}}$, podrán determinarse las variaciones en la producción de cada sector como así también las variaciones en los costos ambientales totales, según las expresiones (2.85) y (2.86) respectivamente.

$$\Delta \mathbf{x} = (\overline{\mathbf{L}_{PI}} - \mathbf{L}_{PI}) \mathbf{e} \quad (2.85)$$

$$\Delta \mathbf{C} = \mathbf{r} [\overline{\mathbf{L}_{PI}} - \mathbf{L}_{PI}] \mathbf{e} \quad (2.86)$$

2.4.5. Equivalencia Matemática entre el Análisis de Proceso y el Análisis Input-Output

Representando las expresiones (2.18) y (2.32), el vector de producción total $\mathbf{x}$ como función de la demanda final $\mathbf{f}$ según el Análisis de Proceso y el Análisis Input-Output respectivamente, es interesante resaltar el hecho de que la expresión (2.18) coincide con la aproximación de la serie de potencias que se utiliza en la práctica para encontrar la matriz inversa de Leontief $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ en el Análisis Input-Output. Por lo tanto, se puede decir que existe una fuerte relación teórica entre el Análisis de Procesos y el Análisis Input-Output, y de hecho PA e IOA convergen a los mismos resultados.

3. Formalización de la Metodología Propuesta

El presente Capítulo presenta y formaliza una metodología para entender con más detalle los fenómenos de consumo de energía, y para cuantificar el impacto a escala nacional de intervenciones de shock en el uso final de la misma. El enfoque propuesto se basa en la extensión del balance energético tradicional cuantificando los servicios energéticos mediante lo que se llamará *unidad de prestación*; caracterizando el grado de *acoplamiento de calidad* entre la energía secundaria utilizada y la exigencia del servicio energético mediante el balance de exergía; y en el vínculo entre el balance energético extendido y un modelo macroeconómico Input-Output. Este enfoque permite evaluar las necesidades sectoriales de energía primaria antes y después de las mejoras en la eficiencia energética en el uso final. La formalización se presenta aquí para los servicios de calefacción y refrigeración como parte de los consumos finales residenciales, pero puede, en principio, extenderse y generalizarse también a otros servicios energéticos, ya sean dentro del sector residencial o para otros sectores de consumo. El Capítulo está dividido en 3 secciones bien diferenciadas, cada una orientada a cada limitación según se puso en evidencia en el Capítulo 1. Como los fundamentos teóricos y los marcos conceptuales de las herramientas y metodologías a las que se recurrirá ya fueron expuestas en el Capítulo precedente, se circunscribirá este Capítulo a formalizar la metodología propuesta y explicar aquellos aspectos novedosos que se desarrollan, recurriendo directamente a resultados del Capítulo 2, sin la demostración o análisis de los mismos.

3.1. Unidad de Prestación

Los sistemas energéticos inician sus transformaciones a partir de las fuentes primarias, mediante sucesivas conversiones se llega a los vectores de consumo final, y posteriormente estos vectores energéticos se convierten en energía útil mediante equipos dedicados a ello (e.g. gasodomésticos, electrodomésticos, automóviles, máquinas industriales, etc.). Luego, la energía útil que se constituye como salida de dichos equipos, es la encargada junto a otros factores exógenos, de generar el servicio energético, fin último del sistema energético en su conjunto (Figura 13). Podría conceptualizarse esta última etapa como una transformación más que se suma a las transformaciones energéticas anteriores, con la salvedad de que esta transformación no tiene como objetivo convertir una forma de energía en otra, sino que su propósito es convertir energía útil en servicio energético. Si se analiza desde el punto de vista termodinámico, sí existe una transformación energética asociada (Figura 13), que será desde una forma de energía útil hacia la forma de energía térmica a muy baja temperatura, pero este fenómeno es accesorio pues el real objetivo es la provisión de un servicio energético.

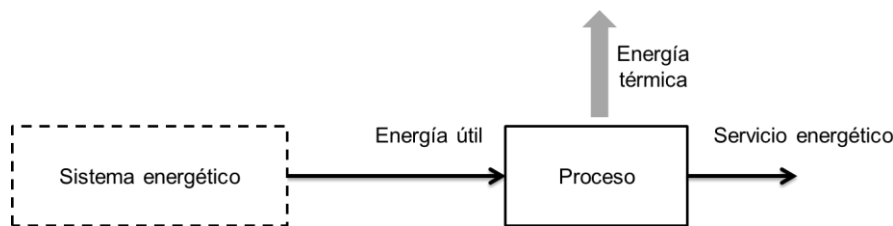


Figura 13: Transformación de energía útil en servicio energético.

Al incluir esta nueva transformación como extensión de los balances de energía, los mismos comenzarían en la energía primaria, y finalizarían no en energía secundaria ni en energía útil, sino en los servicios energéticos, según se muestra en la Figura 14, y permitirían observar la verdadera utilidad o beneficio de todo el sistema energético.

Es entonces necesario definir y caracterizar un proceso de *transformación de energía útil en servicio energético*, hasta el punto de poder definirlo de forma cuantitativa. Así como al equipamiento que convierte energía secundaria en energía útil se los suele llamar *sistema activo*, al conjunto de variables exógenas que configuran la transformación de energía útil en servicio energético se lo denomina en la literatura como *sistema pasivo* (Cullen y Allwood, 2010a).

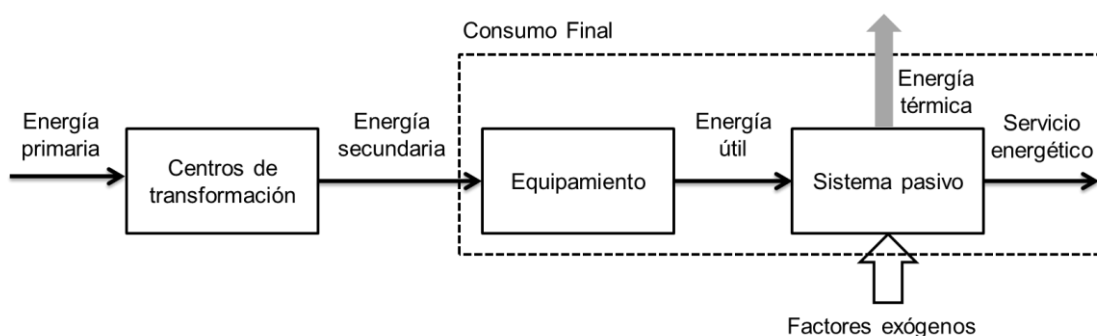


Figura 14: Balance energético extendido desde la energía primaria hasta el servicio energético.

3.1.1. Aspectos Preliminares y Conceptualización

La unidad de prestación representa la cantidad de un determinado servicio energético, obtenido dicho servicio energético a partir de un *proceso*, en el que la energía útil proveniente del sistema energético actúa como insumo junto a otros factores y condicionantes exógenos (Figura 15). En otras palabras, no es más que la cuantificación de un determinado servicio energético. Por lo tanto, el mayor desafío para la definición de la unidad de prestación radica en la cuantificación de la misma y a su vez de los factores y condicionantes exógenos que inciden en su determinación. A modo de ejemplo, si el servicio energético es la producción de aluminio, la unidad de prestación asociada será la producción de cierta cantidad de aluminio, con específicas

características de calidad, pero a su vez para poder definirla será necesario identificar los factores exógenos que condicionan su producción como ser las características de la materia prima, la temperatura del ambiente, el tipo de proceso mediante el cual se obtiene, la pericia del operador, etc. El caso del servicio energético de refrigeración de ambientes tendrá como unidad de prestación asociada una determinada cantidad de confort térmico, debiéndose definir una temperatura interior al ambiente que se refrigera, humedad, velocidad de movimiento de aire, e incluso temperatura media radiante de paredes que confinan el aire del ambiente que se refrigera. También es necesario definir cuánto confort se estaría proporcionando, durante cuánto tiempo, para una persona o para un conjunto de personas, en un ambiente grande o pequeño. Pero además de caracterizar de la forma más inequívoca posible el servicio energético debe realizarse lo mismo con los factores y condicionantes exógenos, que en este caso serían la temperatura ambiente, la radiación solar, las características de la envolvente térmica del ambiente, la superficie del ambiente dentro del cual se pretende brindar confort, etc., requiriendo esto la necesidad de establecer y definir de forma inequívoca supuestos y parámetros.

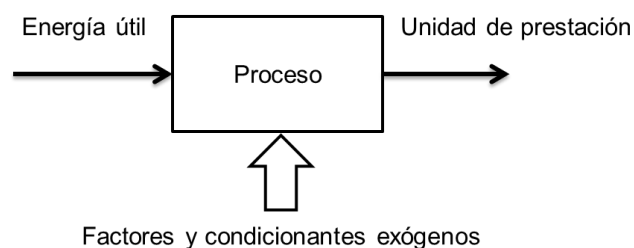


Figura 15: Proceso de conversión de energía útil en unidad de prestación.

La real importancia de contar con unidades de prestación bien definidas radica en la posibilidad de comparar los requerimientos de energía útil (y consecuentemente energía secundaria y primaria) necesarios para poder brindar servicios energéticos de las mismas características en diferentes regiones, países, economías, contextos productivos, socioculturales o ambientales. Por ejemplo, habiendo definido la unidad de prestación producción de una tonelada de aluminio de determinadas características se podrá comparar el requerimiento energético en distintos tipos de procesos, radicados en diferentes países y utilizando variadas tecnologías, y no sólo se obtendría una idea de la eficiencia del horno involucrado sino de todo el contexto que configura el proceso. Esto permitirá entonces poder comparar dos procesos energéticos de producción de aluminio, y en caso de que algún factor exógeno (e.g. la temperatura ambiente) no sea el mismo en las dos situaciones, existirán herramientas de ajuste que permitan normalizar las unidades de prestación a los fines de poder comparar. El caso de calefacción o refrigeración de ambientes también es susceptible de analizarse desde la misma perspectiva, pues bien definidas las unidades de prestación podrán compararse requerimientos de energía para calefacción de hogares, y claramente será necesario normalizar a los efectos de luego realizar los ajustes correspondientes debidos a la *exigencia o dureza* del clima, la calidad de las construcciones, el nivel de desarrollo socioeconómico y los estándares de confort pretendidos por una sociedad. A modo de ejemplo, en los servicios energéticos de calefacción y refrigeración el esfuerzo para *generar el confort* o *brindar el servicio* no será el mismo si se considera que la vivienda es habitada por una o varias personas, si

la vivienda posee una superficie de $400m^2$ o $40m^2$, o si está emplazada en un clima templado o polar, etc., por lo tanto identificar estos factores y condicionantes es de gran relevancia a los efectos posteriores de poder comparar la energía útil que se necesita en una ciudad en relación a otra o respecto de una ciudad de referencia. En esta tarea de definir la unidad de prestación para un servicio energético determinado, se advierte que su definición no puede ser universal, pues se llegaría a un valor que poco diría respecto de la eficiencia en la provisión del servicio energético.

Los factores y condicionantes exógenos, tal como se explicó anteriormente son de formas, orígenes y características muy variadas. En la tarea de cuantificar los mismos, según se postuló en el enunciado precedente, una primera estrategia es su *clasificación*, con el objetivo de obtener un agrupamiento de condicionantes y factores exógenos que tengan características similares. A tales efectos, se *definen categorías de condicionantes*, existiendo distintas categorías para diferentes usos. Una categoría agrupa condicionantes de similares características y tratamiento. Como ejemplo, pensando en la unidad de prestación de calefacción existirán *condicionantes climáticos* (e.g. temperatura media exterior, humedad exterior, radiación solar, etc.), *condicionantes socioeconómicos y culturales* (e.g. calidad de las viviendas en cuanto a su envolvente, calidad de los sistemas de calefacción, metros cuadrados habitables en las viviendas, nivel de confort pretendido en cuanto a duración, temperatura de confort adoptada, cantidad de ambientes acondicionados), *condicionantes urbanísticos o de emplazamiento* (acceso a vectores energéticos, limitaciones en cuanto al diseño y construcción de viviendas). Cada servicio energético tendrá condicionantes que se agrupen en distintas categorías, estas categorías no necesariamente serán las mismas para distintos servicios energéticos, aunque en términos generales y en aras de estandarizar sería conveniente que así lo fueran. Luego para los distintos sectores de consumo, sí las categorías de condicionantes serán diferentes (e.g. para los usos del sector industrial los condicionantes climáticos no serán tan relevantes como para los usos del sector residencial). Así, cada sector de consumo final tendrá categorías de condicionantes, y dentro de cada categoría se agruparán los mismos. En la Tabla 5 se muestra un esquema de estructuras de categorías de condicionantes y condicionantes propiamente dichos, mientras que en la Tabla 6 se brinda un ejemplo para los sectores residencial e industrial.

Tabla 5: Estructura de categorías de condicionantes por sector de consumo final.

Sector	Categoría	Condicionante
Residencial	Categoría 1	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante N
	Categoría 2	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante M
	...Categoría N	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante L
	Categoría 1	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante O
Comercial, público y servicios	Categoría 2	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante P
	...Categoría M	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante Q
	Categoría 1	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante R
	Categoría 2	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante S
Industrial	...Categoría L	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante T
	Categoría 1	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante U
	Categoría 2	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante V
	...Categoría O	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante W
Agropecuario	Categoría 1	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante X
	Categoría 2	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante Y
	...Categoría P	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante Z
Transporte	Categoría 2	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante Y
	...Categoría P	Condicionante 1
		Condicionante 2
		...Condicionante Z

Tabla 6: Ejemplo de categorías y condicionantes para los sectores residencial e industrial.

Sector	Categoría	Condicionante
Residencial	Climáticos y ambientales	Temperatura exterior
		Radiación solar
		Duración de períodos de climatización
	Socioeconómicos y culturales	Nivel de confort pretendido
		Calidad de las construcciones
		Superficie de ambientes
		Disponibilidad de vectores energéticos
	Urbanísticos	Restricciones urbanísticas
		Regulaciones sobre uso de energía
	Tecnológicos / productivos	Tecnología específica utilizada
Capacitación de personal		
Disponibilidad de recursos científicos		
Industrial	Climáticos	Temperatura exterior
		Humedad relativa
		Radiación solar
	Económicos / productivos	Disponibilidad de materia prima
		Disponibilidad de vectores energéticos
		Recursos de capital disponibles

3.1.2. Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración

La generación de una unidad de prestación de calefacción o refrigeración se conceptualiza como un proceso (Figura 16), cuya entrada es energía térmica (en cualquier dirección) y cuya salida es *el servicio energético de confort térmico*. Para obtener dicho confort térmico, la cantidad de energía térmica requerida (i.e. la energía térmica que se necesite agregar en período de calefacción o quitar en período de refrigeración) estará condicionada por factores y condicionantes exógenos según fue explicado en el párrafo precedente.

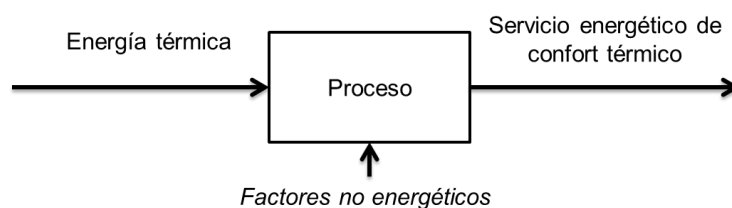


Figura 16: Proceso de conversión de energía térmica en servicio energético

Se establecen dos categorías de condicionantes para las unidades de prestación de calefacción y refrigeración, denominándose categorías I y II.

- *Categoría de condicionantes socioeconómicos (I):* consideran la calidad de la unidad de prestación relacionada con los estándares socioeconómicos: características de los edificios, superficie,

dimensiones de las habitaciones y nivel de confort previsto. Dentro de esta categoría se establecerán dos condicionantes, uno que intente reflejar el nivel de desarrollo socioeconómico estructural, de largo plazo, invariante a coyunturas económicas que se llamará *condición socioeconómica*; mientras que otro en cambio intentará reflejar cuestiones económicas de coyuntura y será denominado *condición de confort*.

- *Categoría de condicionantes climáticos (II)*: esta categoría agrupa todos los factores y condicionantes climáticos en que se encuentra emplazada la vivienda (e.g. tipo de clima, duración del período de calefacción y refrigeración, temperaturas máximas y mínimas promedio, radiación solar, intensidad y perfil del viento). Si bien los factores climáticos son muchos, pues son varias las variables que consideran el clima en el caso de calefacción y refrigeración todos se condensarán en un solo condicionante, que caracterizará el clima de forma integral. En caso de tratarse de otra unidad de prestación como por ejemplo iluminación, existirán factores climáticos que no incidirán (e.g. temperatura, velocidad de viento) pero otros que sí, y depende de cómo se sistematice la determinación de la unidad de prestación deberán estos factores condensarse en uno solo o no. Se advertirá a posteriori que el hecho de juntar todos los factores climáticos en un solo indicador responde a la necesidad de estandarizar el procedimiento y hacerlo compatible con metodologías habituales y difundidas de balances térmicos en inmuebles.

Es importante remarcar que los condicionantes climáticos son estáticos, pues no varían con el tiempo, y si lo hacen las son pequeñas variaciones y se dan en tiempos muy largos (e.g. producto de cambios en el clima de una localidad). Por el contrario, los condicionantes socioeconómicos son dinámicos, y como se explicó, existirán de largo plazo (e.g. el desarrollo socioeconómico obtenido luego de décadas de crecimiento lo que vuelve a las poblaciones más exigentes en términos de estándares de confort (Hu et al., 2017)) y otros de corto plazo (e.g. las variaciones en las pretensiones de bienestar debido a coyunturas económicas puntuales) (Haas et al., 2008). En este sentido, en la presente propuesta se definirán dos condicionantes (condición de confort y condición socioeconómica). La condición de confort contempla el nivel de desarrollo o de exigencia de una región o zona de estudio, en la misma sólo se consideran la temperatura interna de confort y el número de días que dicha temperatura se debe garantizar a través de los sistemas de calefacción o refrigeración. Esta condición involucra variables de rápida variación, y fundamentalmente muy elásticas a parámetros económicos y coyunturales como pueden ser las tarifas energéticas, el ingreso familiar, la capacidad de ahorro, etc. (e.g. si un mes el ingreso familiar su menor al esperado es probable que el ajuste de gastos provenga de encender menos los equipos de calefacción y refrigeración, o ante un aumento de tarifa energética el consumo se resienta). Incluso, esta variación puede ser rápida y de forma brusca, sin necesidad de que sucedan cambios estructurales. La condición socioeconómica, por el contrario, refleja el desarrollo socioeconómico de largo plazo asociado a factores estructurales y de lenta variación que tienen que ver con la estructura urbana, la calidad de la infraestructura existente en la localidad, y la estructura y calidad habitacional. Como carácter distintivo de la condición de confort, la condición socioeconómica también involucra otros aspectos que poco y nada tienen que ver con la energía. Además, su valor es el mismo para las unidades de prestación de calefacción y refrigeración, pues al ser de tipo estructurales, no dependen del período del año que se esté considerando.

3.1.3. Definición de las Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración

En los párrafos precedentes se ha instalado el concepto de unidad de prestación, entendida como la cuantificación de un determinado servicio energético. Esta *instalación paulatina* ha sido necesaria para preparar el campo conceptual de cara al momento más crítico de esta formalización, que consiste en el problema de *cuantificar o poner un valor numérico al servicio energético de confort térmico*, que es esencial y naturalmente cuantitativo. Así, *se cuantificará la unidad de prestación de calefacción y refrigeración a partir de la energía útil que resulte necesaria para obtener la cantidad de servicio energético determinada y bajo las condiciones preestablecidas*. Para poder calcular entonces las unidades de prestación de calefacción y refrigeración será necesario hacer un cálculo de energía útil, lo que conlleva la realización de un balance térmico, y será necesario introducir un *prototipo de vivienda de prueba* a los efectos de poder realizar el pretendido balance térmico. Además, se introducirán tres condicionantes: las *condiciones de confort* y *socioeconómica*, ambas pertenecientes a la categoría I, y la *condición climática* perteneciente a la categoría II. Estos condicionantes también siendo en esencia cualitativos (aunque muchos de ellos se pueden elaborar a partir de datos cuantitativos) deberán ser representados por variables cuantitativas.

La unidad de prestación de calefacción $UP_{c,obj}$ (kWh/p) se define como la energía útil necesaria para garantizar confort térmico para una persona (i.e. servicio energético) durante todo el período de calefacción, bajo condiciones climáticas zc_c , condiciones de confort c_c y contexto socioeconómico se preestablecidos. De forma análoga, la unidad de prestación de refrigeración $UP_{r,obj}$ (kWh/p) se define como la energía útil necesaria para garantizar confort térmico para una persona (i.e. servicio energético) durante todo el período de refrigeración, bajo condiciones climáticas zc_r , condiciones de confort c_r y contexto socioeconómico se preestablecidos. La representación esquemática de estas relaciones se observan en la Figura 17. En términos formales, se puede a priori, escribir las mismas como funciones de tres variables, en donde cada variable representa un condicionante específico según las expresiones (3.1) (3.2),

$$UP_c = f(zc_c; c_c; se) \quad (3.1)$$

$$UP_r = g(zc_r; c_r; se) \quad (3.2)$$

donde:

zc_c ; zc_r : representan las condiciones climáticas para calefacción y refrigeración respectivamente;

c_c ; c_r : representan las condiciones de confort para calefacción y refrigeración respectivamente;

se : representa la condición socioeconómica.

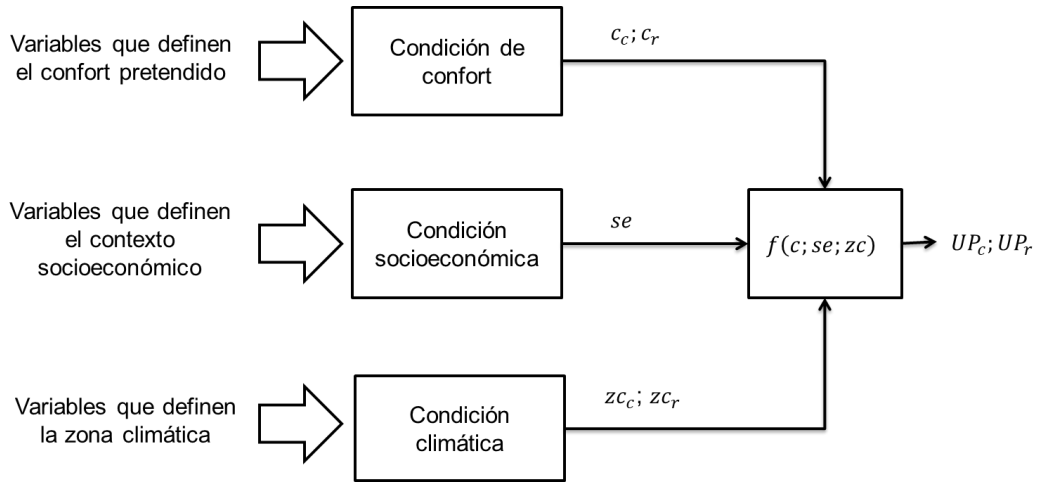


Figura 17: Esquema de determinación de unidad de prestación de calefacción y refrigeración.

La condición de confort (a) está determinada por el número de días en los que se pretende mantener el confort térmico D_{conf} y la temperatura de dicho confort θ_{conf} (i.e. la temperatura que se quiere mantener en el interior de los ambientes); la condición socioeconómica (b) se determina a partir del área promedio de las viviendas A_{imm} , de la ocupación promedio de las mismas O , y la fracción del área climatizada de las mismas a_{clim} ; mientras que la condición climática (c) se determina por los períodos de calefacción y refrigeración establecido para el clima particular M ; D_i , la temperatura media exterior de cada mes $\theta_{ext,i}$ y la irradiancia solar media mensual sobre el plano horizontal para cada mes del año $I_{sol,i}$. A su vez, para poder realizar el cálculo de la condición climática la introducción del prototipo de vivienda de prueba es necesario con sus características térmicas específicas (U ; b ; etc.) sobre las que se brindarán más detalles en los sucesivos párrafos. A modo de resumen en la Figura 18 se muestra la unidad de prestación como función de los tres condicionantes y las variables que determinan dichos condicionantes. Estas variables que se considerarán luego para la definición de las tres condiciones, en algunos casos se introducen o utilizan en el cálculo de otra condición (e.g. la temperatura de confort, aún perteneciendo al conjunto de variables que caracterizan el nivel de confort pretendido, se introduce en el cálculo de la condición climática; los días de calefacción o refrigeración de cada mes si bien es una variable que caracteriza la condición climática, se necesita también para calcular la condición de confort). Por lo tanto, una cosa es lo que la variable representa, dentro de qué condición se enmarca, y otra cosa será la necesidad de que dicha variable intervenga en la cuantificación de otra condición. Podría conceptualizarse de forma más general este fenómeno diciendo que las condiciones no son variables independientes o desacopladas entre sí.

Es importante resaltar y aclarar que la elección de estas variables constituye una parte de la propuesta metodológica, pero bien podrían adoptarse otras pensando en una futura implementación. Las variables que se adopten deben lograr un compromiso entre exactitud y fiabilidad del modelo de cuantificación, y la posibilidad de obtención de datos, sencillez del modelo y en definitiva aplicabilidad del mismo. Un ejemplo del compromiso buscado se da en la propuesta de la variable temperatura de confort θ_{conf} como *único indicador del confort térmico*, a sabiendas de que el confort térmico dentro de una habitación está configurado por

muchas otras variables como la humedad relativa, la velocidad promedio de movimiento de aire, la temperatura radiante media de superficies circundantes (i.e. fenómeno radiativo). Existen numerosos modelos de determinación del confort higrotérmico, y cada modelo se nutre de diferentes variables y pondera de diverso modo cada una de ellas, la adopción de alguno de ellos debe analizarse al momento de la aplicación. Sobre este argumento se darán más detalles en el Capítulo 0.

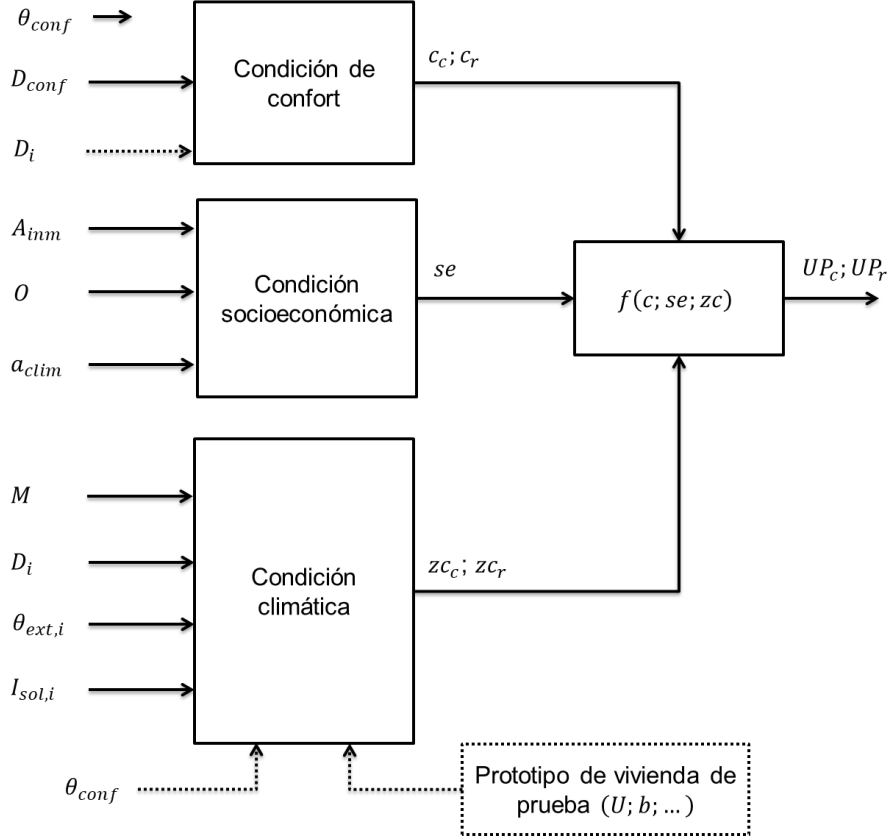


Figura 18: Unidades de prestación, condicionantes y variables.

- *Unidades de Prestación de Referencia*

Se define la unidad de prestación de calefacción de referencia $UP_{c,obj,0}$ y la unidad de prestación de refrigeración de referencia $UP_{r,obj,0}$, como las unidades de prestación respectivas definidas para una localidad de referencia, es decir con las condiciones climáticas $zc_{c,0}$ y $zc_{r,0}$, las condiciones de confort de referencia $c_{c,0}$ y $c_{r,0}$, y la condición socioeconómica de referencia se_0 , tal como se observa en las expresiones (3.3) y (3.4).

$$UP_{c,obj,0} = f(zc_{c,0}; c_{c,0}; se_0) \quad (3.3)$$

$$UP_{r,obj,0} = f(zc_{r,0}; c_{r,0}; se_0) \quad (3.4)$$

Para la definición de las unidades de prestación de calefacción y de refrigeración de referencia, es necesario elegir una localidad *real* o *virtual* para la cual se definan las tres condiciones de referencia para ambos casos

(i.e. condición climática, condición de confort y condición socioeconómica). A partir del establecimiento de las unidades de prestación de referencia, se podrá caracterizar entonces cualquier unidad de prestación en término de *unidades de prestación de referencia equivalentes*. Este mecanismo permitirá comparar por ejemplo distintas localidades respecto de una referencia. Se advierte aquí que el real aporte de esta formalización no radica en el valor absoluto de una determinada unidad de prestación sino en la relación entre dichos valores para diferentes localidades. Las unidades de prestación de referencia actuarán entonces como patrón o medida al cual referenciar los valores para distintas localidades o poblaciones.

3.1.4. Cálculo de las Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración

Retomando las definiciones del párrafo precedente para las unidades de prestación de calefacción y refrigeración, y partiendo de las expresiones genéricas (3.1) y (3.2), el cálculo de las mismas se realiza según las expresiones (3.5) y (3.6).

$$UP_c = zc_c \cdot c_c \cdot se \quad (3.5)$$

$$UP_r = zc_r \cdot c_r \cdot se \quad (3.6)$$

A partir de las dos fórmulas anteriores, y observando que las unidades de prestación deben contabilizarse en unidades energía por persona (kWh/p); entonces se propone que las condiciones climáticas zc_c y zc_r estén expresada en unidades de energía por metro cuadrado (kWh/m^2), las condiciones de confort c_c y c_r sean adimensionales, mientras que las condiciones socioeconómicas se expresen en metros cuadrados por persona (m^2/p). Se presentan a continuación los detalles de cálculo para la obtención de las tres condiciones, cuyo producto determina el valor de las unidades de prestación buscadas.

- *Condición de confort (Categoría I)*

La condición de confort, conforme se explicó anteriormente, intenta reflejar el nivel de bienestar pretendido relacionado con factores coyunturales y de corto plazo. Las condiciones de confort para calefacción y refrigeración c_c y c_r (*adimensionales*), se calculan según las expresiones (3.7) y (3.8),

$$c_c = \frac{D_{conf,c}}{\sum_{i=1}^{M_c} D_i} \quad (3.7)$$

$$c_r = \frac{D_{conf,r}}{\sum_{i=1}^{M_r} D_i} \quad (3.8)$$

donde:

$D_{conf,c}$ es el número de días del período de calefacción en los cuales se garantiza la temperatura de confort ($\theta_{conf,c}$) en los ambientes climatizados;

$D_{conf,r}$ es el número de días del período de refrigeración en los cuales se garantiza la temperatura de confort ($\theta_{conf,r}$) en los ambientes climatizados;

M_c es el número de meses que componen el período de calefacción del clima considerado;

M_r es el número de meses que componen el período de refrigeración del clima considerado;

D_i es el número de días de calefacción o refrigeración que conforman el i-ésimo mes.

El número de días de confort D_{conf} nunca podrá ser mayor que los días de calefacción o refrigeración del clima que se considere, es decir, deberá cumplirse la relación (3.9).

$$D_{conf} \leq \sum_{i=1}^M D_i \quad (3.9)$$

La condición de confort representa, valga la redundancia, el nivel de confort térmico pretendido. Las variables que se consideran son la temperatura interna de confort de ambientes considerados climatizados θ_{conf} y el número de días de confort D_{conf} . Si bien estas dos variables son las que definen el confort pretendido, una de ellas (θ_{conf}) introduce el confort en el cálculo de la condición climática, es decir si bien es una variable que pertenece al conjunto las que definen el confort, su incorporación al cálculo se hace en otra instancia. A su vez, el número de días de calefacción o refrigeración del mes D_i , siendo una variable de la condición climática se necesita para el cálculo de la condición de confort. Así, como se observa en las expresiones (3.7) y (3.8), la condición de confort se define analíticamente a partir de D_{conf} y D_i .

- *Condición socioeconómica (Categoría I)*

La condición socioeconómica, como se explicó anteriormente, intenta reflejar el nivel de desarrollo y bienestar estructural de largo plazo de una población, contrariamente a la condición de confort definida recientemente que reflejaba factores coyunturales. La condición socioeconómica está definida en esta propuesta a partir de la superficie promedio de las viviendas, la superficie climatizada de las mismas y la ocupación promedio de las mismas, pero como se anticipó pueden incorporarse otras variables a criterio del implementador. La condición socioeconómica *se* (m^2/p) se calcula entonces según la expresión (3.10),

$$se = \frac{A_{imm} \cdot a_{clim}}{O} \quad (3.10)$$

donde:

A_{imm} es el área promedio de las edificaciones residenciales de la región de estudio (m^2);

O es la ocupación promedio de las edificaciones residenciales de la localidad analizada (p);

a_{clim} es la fracción de superficie climatizada respecto de la superficie total del inmueble.

- *Condición climática (Categoría II)*

La condición climática busca reflejar *la dureza* o *la exigencia* del clima en el cual se encuentra emplazada una vivienda, dentro de la cual se intenta garantizar la unidad de prestación, tanto para el caso de calefacción o refrigeración. La condición climática queda determinada por *la cantidad específica de energía térmica* (i.e. energía térmica por metro cuadrado) *que se necesite agregar o quitar* (según se trate del caso de calefacción o refrigeración) *al prototipo de vivienda de prueba para mantener la temperatura interior igual a la temperatura de confort durante toda la estación de calefacción o refrigeración* según se trate.

Existen vastos procedimientos para el cálculo de dicha energía térmica específica, pues la tarea en esencia no es más que la realización de un balance térmico en el interior del prototipo de vivienda de prueba considerando su interacción con el exterior. Se puede considerar la utilización de modelos dinámicos o estacionarios, de resolución analítica o computacional y de mayor o menor complejidad tanto en los datos de entrada al modelo, como del cálculo en sí. El método que se seleccione no altera los fundamentos conceptuales sobre los que se erige la presente propuesta metodológica, y la elección del mismo (como sucede con otras decisiones dentro de la misma propuesta) debe realizarse buscando un compromiso entre calidad de los resultados, compatibilidad con otros estudios aplicados a la cuestión energética y finalmente la aplicabilidad. Se sugiere que el balance térmico se realice según los procedimientos adoptados a nivel nacional en los sistemas de calificación o certificación de eficiencia energética de edificios, para garantizar la compatibilidad de la metodología propuesta con insumos de datos y resultados probablemente ya existentes a escala nacional. Una alternativa interesante como metodología de evaluación de requerimientos de energía es la utilización de un modelo dinámico de resolución analítica, basado en la descomposición armónica de las variables climáticas (Stagnitta et al., 2018, 2017). Este método tiene la ventaja de ser dinámico y de resolución analítica a la vez, logrando un buen equilibrio entre calidad de resultados y sencillez en su aplicación.

Independientemente del modelo de cálculo de balance térmico que se adopte, todos necesitan una vivienda o edificio para poder realizar el cálculo. Para ello, se introduce el prototipo de vivienda de prueba como una entidad que posibilita la realización del cálculo de energía térmica.

- *Prototipo de vivienda de prueba*

El prototipo de vivienda de prueba, puede ser un edificio real, un prototipo real, o simplemente una entidad abstracta con determinadas características térmicas. El objetivo de la misma es sencillamente, como se anticipó, posibilitar el balance térmico. Puede hacerse una analogía entre el prototipo de vivienda de prueba y la carga de prueba que se utiliza para determinar el campo eléctrico producido por una distribución de cargas en cada punto del espacio, aquí la carga de prueba es sencillamente un instrumento que posibilita el cálculo (generalmente se calcula la fuerza eléctrica mediante la Ley de Coulomb y luego se divide por la carga de prueba para obtener el campo eléctrico).

En caso de que el prototipo de vivienda de prueba sea una edificación real, un prototipo o una entidad con dimensiones, entonces a partir de ella deberán obtenerse características térmicas específicas (i.e. por metro cuadrado de edificio). En el caso de que la definición sea directamente como una entidad abstracta sin dimensiones ni forma, entonces se definirán características térmicas específicas. Cualquiera sea la forma de

definir el prototipo de vivienda de prueba, debe estar caracterizado *al menos* por los parámetros térmicos que se presentan en la Tabla 7 (IRAM, 2017).

Tabla 7: Parámetros térmicos específicos del prototipo de vivienda de prueba

Símbolo	Unidad	Descripción
S/A	m^2/m^2	Relación superficie de envolvente – superficie
b	-	Factor de ajuste promedio que considera temperatura de ambientes adyacentes
U	W/m^2K	Transmitancia media de envolvente opaca
U_w	W/m^2K	Transmitancia media de envolvente transparente
e	-	Fracción de superficie de envolvente transparente sobre envolvente total
α	-	Coefficiente de absorción promedio de envolvente opaca
g	-	Coefficiente de transmisión promedio de envolvente transparente
$H_{inf,c}$	W/m^2K	Coefficiente específico de intercambio térmico por infiltraciones en invierno
$H_{inf,r}$	W/m^2K	Coefficiente específico de intercambio térmico por infiltraciones y renovaciones en verano
τ_c	h	Constante de tiempo de invierno
τ_r	h	Constante de tiempo de verano

A partir de la Tabla 7, se puede obtener un indicador global de las características térmicas de la envolvente del prototipo de vivienda de prueba llamado coeficiente de intercambio térmico específico por transmisión H_{tr} (Davies, 2006; Stagnitta et al., 2018; Wit, 2009) y se calcula a partir de la expresión (3.11).

$$H_{tr} = [Ub(1 - e) + U_w e] S/A \quad (3.11)$$

Además, combinando los coeficientes específicos de intercambio por transmisión e infiltraciones se obtienen los *coeficientes de intercambio térmico específico* para calefacción H_c y para refrigeración H_r (W/m^2K). Estos coeficientes condensan la información respecto del comportamiento térmico del prototipo de vivienda de prueba para una diferencia de temperatura entre interior y exterior. Los mismos se calculan conforme las expresiones (3.12) y (3.13) según sea el caso.

$$H_c = H_{tr} + H_{inf,c} \quad (3.12)$$

$$H_r = H_{tr} + H_{inf,r} \quad (3.13)$$

Si bien la definición del prototipo de vivienda de prueba, sea como entidad abstracta o arquetipo real, es conceptualmente independiente del método de cálculo que se utilice para realizar el balance térmico, es útil saber a priori qué método de cálculo se utilizará, para no incurrir en el error de definir un prototipo de vivienda de prueba con muchos parámetros que luego el método de cálculo no puede considerar, o por el contrario, definir un prototipo muy sencillo y *aproximado* que no permita luego aplicar el método de cálculo por necesitarse más parámetros. Como conclusión, la elección del método de cálculo y la definición del prototipo de vivienda de prueba son decisiones que no pueden tomarse de modo independiente, y deben realizarse buscando un justo y equilibrado compromiso entre exactitud de resultados y factibilidad en la implementación.

- *Cálculo de la condición climática*

Se propone en este punto un cálculo simplificado, realizándose el balance térmico mediante un modelo estacionario con corrección dinámica. Este cálculo podría hacerse de forma más compleja, contemplando más detalles en la definición de la vivienda de prueba y con herramientas más sofisticadas para estudiar los flujos de energía en edificaciones. La simplicidad de los cálculos propuestos en los siguientes párrafos, junto con los pocos datos que se necesitan para definir el prototipo de vivienda de prueba se constituyen como una fortaleza de esta metodología propuesta pues permite la fácil aplicación.

Se presenta entonces a continuación el método de cálculo basado en la norma IRAM 11900:2017, enmarcado en los procedimientos de balance térmico de la norma ISO 13790:2008 (IRAM, 2017; ISO, 2008), pudiéndose utilizar por defecto en ausencia de cualquier otra metodología estandarizada o adoptada a nivel nacional.

Las condiciones climáticas de calefacción zC_c y refrigeración zC_r (kWh/m^2) se calculan según las expresiones (3.14) y (3.15) respectivamente,

$$zC_c = \sum_{i=1}^{M_c} Q_{u,c,i} \quad (3.14)$$

$$zC_r = \sum_{i=1}^{M_r} Q_{u,r,i} \quad (3.15)$$

donde:

$Q_{u,c,i}$ es el requerimiento mensual específico (i.e. por metro cuadrado de vivienda) de energía útil del prototipo de vivienda de prueba en el i-ésimo mes de calefacción (kWh/m^2);

M_c es el número de meses que componen el período de calefacción;

$Q_{u,r,i}$ es el requerimiento mensual específico de energía útil del prototipo de vivienda de prueba en el i-ésimo mes de refrigeración (kWh/m^2);

M_r es el número de meses que componen el período de refrigeración.

El cálculo del requerimiento de energía térmica para el i-ésimo mes de calefacción $Q_{u,c,i}$ se calcula según la expresión (3.16), mientras que en el caso de refrigeración $Q_{u,r,i}$ la expresión correspondiente es (3.17),

$$Q_{u,c,i} = (Q_{tr,i} + Q_{rad,i} + Q_{inf,i}) - \eta_{gr,i} Q_{gr,i} \quad (3.16)$$

$$Q_{u,r,i} = Q_{gr,i} - \eta_{disp,i} (Q_{tr,i} + Q_{rad,i} + Q_{inf,i}) \quad (3.17)$$

donde:

$Q_{tr,i}$ es la energía térmica específica intercambiada con el exterior por transmisión a través de la envolvente en el i-ésimo mes (kWh/m^2);

$Q_{rad,i}$ es la energía térmica específica intercambiada por radiación a la bóveda en el i-ésimo mes (kWh/m^2);

$Q_{inf,i}$ es la energía térmica específica intercambiada por infiltraciones en el i-ésimo mes (kWh/m^2);

$Q_{gr,i}$ es el aporte de energía térmica específica gratuita de origen solar en el i-ésimo mes (kWh/m^2);

$\eta_{gr,i}$ es el factor de utilización de la energía térmica específica de origen solar en el i-ésimo mes (*adimensional*);

$\eta_{disp,i}$ es el factor de utilización de las dispersiones térmicas específicas en el i-ésimo mes (*adimensional*).

Las expresiones anteriores (3.16) y (3.17) son esencialmente iguales, mientras que en el caso de calefacción las pérdidas son el problema y los aportes gratuitos de energía son un beneficio, en la refrigeración se da lo contrario, las ganancias de energía son un problema mientras que las pérdidas son beneficiosas. Así al haber cambiado los signos, en calefacción el resultado de la expresión (3.16) arroja la cantidad de energía que se debiera agregar a los ambientes para mantener la temperatura de confort, mientras que en refrigeración el resultado de la expresión (3.17) refleja la energía que se debe quitar de los ambientes.

La energía térmica específica intercambiada con el exterior por transmisión a través de la envolvente en el i-ésimo mes $Q_{tr,i}$ se calcula mediante las expresiones (3.18) y (3.19) según se trate de calefacción o refrigeración,

$$Q_{tr,i} = 10^{-3} H_{tr} (\theta_{conf,c} - \theta_{ext,i}) T_i \quad (3.18)$$

$$Q_{tr,i} = 10^{-3} H_{tr} (\theta_{conf,r} - \theta_{ext,i}) T_i \quad (3.19)$$

donde:

H_{tr} es el coeficiente de intercambio térmico específico por transmisión del prototipo de vivienda de prueba;

$\theta_{conf,c}$ es la temperatura interna de confort de calefacción definida en la condición de confort ($^{\circ}C$);

$\theta_{conf,r}$ es la temperatura interna de confort de refrigeración definida en la condición de confort ($^{\circ}C$);

$\theta_{ext,i}$ es la temperatura media externa del i-ésimo mes del clima considerado ($^{\circ}C$);

T_i representa el número de horas del i-ésimo mes (h), calculado como $24 \cdot D_i$, donde D_i es el número de días de climatización del mes considerado.

La energía térmica específica intercambiada por radiación a la bóveda en el i-ésimo mes $Q_{rad,i}$ se calcula mediante la expresión (3.20),

$$Q_{rad,i} = 10^{-3} H_{tr} F_v R_{se} h_{rad} \Delta \theta_{cielo} T_i \quad (3.20)$$

donde:

H_{tr} es el coeficiente de intercambio térmico específico por transmisión del prototipo de vivienda de prueba;

F_v es el factor de vista entre las superficies que conforman la envolvente de la vivienda y la bóveda, para lo que se adopta el valor constante de 0,75;

R_{se} es la resistencia superficial externa, que asume un valor de $0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (IRAM, 2017);

h_{rad} es el coeficiente de intercambio radiativo, que se asume en un valor constante igual a $4,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$;

$\Delta\theta_{cielo}$ es la diferencia de temperatura entre la cara exterior de las superficies que conforman la envolvente del prototipo de vivienda de prueba y la temperatura de cielo, asumida en $11 \text{ }^\circ\text{C}$ para todos los meses;

T_i representa el número de horas del i-ésimo mes (h), calculado como $24 \cdot D_i$, donde D_i es el número de días de climatización del mes considerado.

La energía térmica específica intercambiada con el exterior por infiltraciones y renovaciones de aire en el i-ésimo mes $Q_{inf,i}$ se calcula mediante las expresiones (3.21) y (3.22) según se trate de calefacción o refrigeración,

$$Q_{inf,i} = 10^{-3} H_{inf,c} (\theta_{conf,c} - \theta_{ext,i}) T_i \quad (3.21)$$

$$Q_{inf,i} = 10^{-3} H_{inf,r} (\theta_{conf,r} - \theta_{ext,i}) T_i \quad (3.22)$$

donde:

$H_{inf,c}$ es el coeficiente específico de intercambio térmico por infiltraciones en invierno del prototipo de vivienda de prueba;

$H_{inf,r}$ es el coeficiente específico de intercambio térmico por infiltraciones en invierno del prototipo de vivienda de prueba;

$\theta_{conf,c}$ es la temperatura interna de confort de calefacción definida en la condición de confort ($^\circ\text{C}$);

$\theta_{conf,r}$ es la temperatura interna de confort de refrigeración definida en la condición de confort ($^\circ\text{C}$);

$\theta_{ext,i}$ es la temperatura media externa del i-ésimo mes del clima considerado ($^\circ\text{C}$);

T_i representa el número de horas del i-ésimo mes (h), calculado como $24 \cdot D_i$, donde D_i es el número de días de climatización del mes considerado.

El aporte de energía térmica específica gratuita de origen solar en el i-ésimo mes $Q_{gr,i}$, se calcula según la expresión (3.23), para ambos casos de calefacción o refrigeración,

$$Q_{gr,i} = 10^{-3} S/A [UbR_{se}\alpha(1 - e) + ge] I_{sol,i} T_i \quad (3.23)$$

donde:

S/A es la relación entre la superficie de envolvente y la superficie de la vivienda;

U es la transmitancia media de la superficie envolvente opaca;

b es el factor de ajuste promedio que considera la temperatura de ambientes adyacentes a los ambientes climatizados del prototipo de vivienda de prueba;

R_{se} es la resistencia superficial externa, que asume un valor de $0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (IRAM, 2017);

α es el coeficiente de absorción promedio de la superficie envolvente opaca;

g es el coeficiente de transmisión promedio de la superficie envolvente transparente;

e es la fracción superficie de envolvente transparente respecto de la superficie envolvente total;

$I_{sol,i}$ es el promedio de la irradiancia media mensual incidente en cinco planos (plano horizontal, y planos verticales orientados al N, S, E y O) localizados en el clima considerado del i -ésimo mes (W/m^2);

T_i representa el número de horas del i -ésimo mes (h), calculado como $24 \cdot D_i$, donde D_i es el número de días de climatización del mes considerado.

Si bien en los distintos procedimientos de cálculo de prestaciones energéticas, ya sean estáticos o dinámicos se consideran que los aportes gratuitos incluyen todas las ganancias solares y ganancias llamadas internas correspondientes al metabolismo de los ocupantes y la disipación de equipos electrodomésticos instalados en la vivienda, en el presente se considerarán exclusivamente ganancias solares a través de superficies opacas y transparentes. Como el objeto del cálculo es sencillamente caracterizar la *exigencia del clima*, se considera que pueden entonces despreciarse otras fuentes internas de energía térmica.

Finalmente, de las expresiones (3.16) y (3.17) resta determinar el factor de utilización de los aportes de energía térmica específica de origen solar $\eta_{gr,i}$ para los meses de calefacción y el factor de utilización de las dispersiones térmicas específicas $\eta_{disp,i}$ para los meses de refrigeración. Ambos factores de utilización dependen de la relación existente entre las ganancias de energía y las pérdidas de energía que suceden para cada mes. Así, se define la relación entre los *aportes de energía térmica específica de origen solar* y las *pérdidas* (transmisión, radiación a la bóveda e infiltraciones y renovaciones de aires) γ_i (*adimensional*) para el i -ésimo mes según la expresión (3.24).

$$\gamma_i = \frac{Q_{gr,i}}{(Q_{tr,i} + Q_{rad,i} + Q_{inf,i})} \quad (3.24)$$

Luego, para el caso de calefacción, el factor de utilización de la energía térmica de origen solar del i -ésimo mes $\eta_{gr,i}$ se calcula según la expresión (3.25),

$$\eta_{gr,i} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_i^{\alpha_c}}{1 - \gamma_i^{(\alpha_c+1)}} & \text{si } \gamma_i > 0 \text{ y } \gamma_i \neq 1 \\ \frac{\alpha_c}{\alpha_c + 1} & \text{si } \gamma_i = 1 \end{cases} \quad (3.25)$$

donde α_c es una constante de ajuste para los meses de calefacción obtenida según la relación (3.26),

$$\alpha_c = \alpha_{c,0} + \frac{\tau_{inv}}{\tau_{inv,0}} \quad (3.26)$$

en la cual:

$\alpha_{c,0}$ es un parámetro numérico adimensional de referencia que vale 0,4 para los meses de calefacción;

τ_c es la constante de tiempo de la vivienda del prototipo de vivienda de prueba para los meses de calefacción;

$\tau_{c,0}$ es la constante de tiempo de referencia que para los meses de calefacción que se adopta igual a 11h.

De forma similar, para el caso de refrigeración, el factor de utilización de las dispersiones térmicas específicas para los meses de refrigeración del i-ésimo mes $\eta_{disp,i}$ se calcula según la expresión (3.27),

$$\eta_{gr,i} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_i^{-\alpha_r}}{1 - \gamma_i^{-(\alpha_r+1)}} & si \quad \gamma_i > 0 \text{ y } \gamma_i \neq 1 \\ \frac{\alpha_r}{\alpha_r + 1} & si \quad \gamma_i = 1 \end{cases} \quad (3.27)$$

donde α_r es una constante de ajuste para los meses de refrigeración obtenida según la relación (3.28),

$$\alpha_r = \alpha_{r,0} + \frac{\tau_{inv}}{\tau_{inv,0}} \quad (3.28)$$

en la cual:

$\alpha_{r,0}$ es un parámetro numérico adimensional de referencia que vale 0 para los meses de refrigeración;

τ_r es la constante de tiempo de la vivienda del prototipo de vivienda de prueba para los meses de refrigeración;

$\tau_{r,0}$ es la constante de tiempo de referencia que para los meses de refrigeración que se adopta igual a 30h.

- *Sensibilidad de la condición climática respecto del prototipo de vivienda de prueba adoptado.*

La introducción del prototipo de vivienda de prueba se ha realizado exclusivamente a los fines de poder calcular un requerimiento de energía térmica y así poder establecer un valor cuantitativo para la condición climática. Como se explicitó al inicio de esta sección, la máxima utilidad y el fin último de las unidades de prestación es la posibilidad de comparar sus valores entre distintas localidades y al mismo tiempo con un valor de referencia de modo de poder referirse a una localidad en términos de unidades de prestación de calefacción o refrigeración equivalentes. Por lo tanto, es de esperar que la relación entre la condición climática de una cierta localidad z_c y la condición climática de referencia z_{c_0} (i.e. z_c/z_{c_0}) sea insensible a variaciones de los parámetros de definición del prototipo de vivienda de prueba. El cumplimiento de esta condición garantizaría la robustez del método, ya que significaría poder caracterizar relaciones entre distintos climas

independientemente de la arbitrariedad existente en la elección del prototipo de vivienda de prueba. Esta condición se puede expresar de forma matemática según la relación (3.29),

$$\left| \frac{\frac{\partial(zc/zc_0)}{\partial \xi} \Delta \xi}{(zc/zc_0)} \right| \leq \rho \quad (3.29)$$

donde:

zc/zc_0 es la relación entre la condición climática de una localidad respecto de la condición climática de la localidad adoptada como referencia;

ξ es una variable genérica que representa cualquier parámetro de definición del prototipo de vivienda de prueba (S/A ; U ; U_w ; b ; e ; α ; τ ; $H_{inf,c}$; $H_{inf,r}$; τ_c ; τ_r);

ρ es un valor arbitrario que se adopta como la cota máxima admisible a la sensibilidad analizada.

3.1.5. Unidad de Prestación, Requerimiento y Consumo de Energía

Luego de haber definido las unidades de prestación de calefacción $UP_{c,obj}$ y refrigeración $UP_{r,obj}$, es necesario desarrollar los procedimientos para poder relacionar las unidades de prestación definidas con los requerimientos asociados y, finalmente, con los consumos energéticos reales asociados a dichos usos. Si bien los desarrollos presentes se hacen exclusivamente para calefacción y refrigeración, en este apartado se referirá de forma genérica a cualquier uso de la energía j (e.g. el j -ésimo uso puede referirse a calefacción, refrigeración, iluminación, bombeo de agua, proceso de fundición, etc.). Se establecen entonces las siguientes definiciones en aras de diferenciar las palabras *requerimiento* y *consumo*:

Requerimiento de energía útil asociado a un determinado uso $E_{u,j}$: es la energía útil *necesaria* para lograr una cantidad de servicio energético de determinado uso. Se expresa en kWh o cualquier unidad de energía.

Requerimiento de energía secundaria asociado a un determinado uso $E_{s,j}$: es la energía secundaria (i.e. vector energético) *necesaria* para lograr cantidad de servicio energético de determinado uso. Se expresa en kWh o cualquier unidad de energía.

Consumo de energía útil asociado a un determinado uso $\tilde{E}_{u,j}$: es el *consumo real* de energía útil asociado a un uso determinado, que se obtiene a partir de mediciones directas o indirectas, registros o técnicas estadísticas. Se expresa en kWh o cualquier unidad de energía.

Consumo de energía secundaria asociada a un determinado uso $\tilde{E}_{s,j}$: es el *consumo real* de energía secundaria (i.e. vector energético) asociada a un uso determinado, que se obtiene a partir de mediciones directas o indirectas, registros o técnicas estadísticas. Se expresa en kWh o cualquier unidad de energía.

El consumo de energía y el requerimiento de energía; en sus formas útil, secundaria y primaria; se refieren a *lo mismo en cuanto a la instancia de la cadena energética* en la que se está, simplemente se distingue entre las palabras consumo y requerimiento entendiendo que consumo es una *cantidad real* de energía que efectivamente se consume, mientras que el requerimiento representa un *valor teórico o estimado* referido a lo que debiera consumirse según ciertas hipótesis. En coherencia con lo anterior, cuando se define una unidad de prestación asociada al j-ésimo uso $UP_{j,obj}$ se utiliza el subíndice *objetivo* (tal como se realizó para los casos de calefacción y refrigeración) pues se trata de una definición teórica, pero cuando se hace referencia a la unidad de prestación efectivamente garantizada (i.e. la cantidad de servicio energético que realmente se proporciona a un caso particular o a una población bajo estudio) no se utiliza el subíndice *objetivo*. La Figura 19 muestra en la parte superior (I) un proceso absolutamente ideal (i.e. requerimiento de energía secundaria, requerimiento de energía útil, unidad de prestación definida), y en la parte inferior (II) un proceso real (i.e. consumo de energía secundaria, consumo de energía útil, unidad de prestación realmente garantizada).

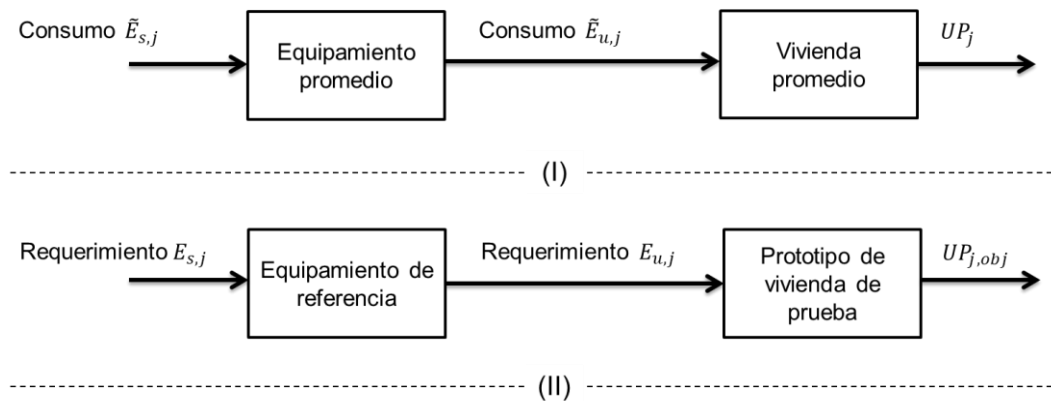


Figura 19: Diferencias entre requerimiento, consumo, unidad de prestación definida y unidad de prestación garantizada.

El valor de un *consumo* se obtiene a partir de mediciones directas o indirectas, mientras que el valor de un *requerimiento* se estima a partir de modelos teóricos que utilizan como parámetros de ingreso otros datos no energéticos que sí son medidos o estimados conforme criterios previamente asumidos. El consumo no tiene por qué ser igual al requerimiento, y de hecho en la realidad se verifica la desigualdad entre los mismos. Esta diferencia radica en varios factores, el más inmediato de todos contempla las incertezas, e incluso errores, al momento de la elaboración del modelo teórico o en los parámetros que se necesitan para su formulación y cálculo. Además de esta natural causa de diferencias (propias de todo contraste entre un modelo teórico y experiencias empíricas) existen otras causas por las que un consumo difiere de un requerimiento, las que se analizan en los siguientes párrafos.

a) *Diferencias en la unidad de prestación proporcionada ($UP_j \neq UP_{j,obj}$).*

La eficiencia del equipamiento es la misma que la del equipamiento de referencia, y las características térmicas de la vivienda promedio son iguales a las definidas para el prototipo de vivienda de prueba, pero la

unidad de prestación garantizada no es la misma que la definida para la locación (i.e. el servicio energético se brinda por defecto o por exceso respecto del definido) (Figura 20). Es decir, en este caso la realidad es exactamente igual a los modelos teóricos, pero quienes obtienen el servicio energético están obteniendo más o menos cantidad del que se definió. En el caso aplicado a la calefacción o refrigeración podría representar esto un sub-confort, sobre-confort, etc. El cociente entre la cantidad de servicio energético efectivamente garantizado (i.e. UP_j) y la cantidad definida (i.e. $UP_{j,obj}$) será definido luego como *factor de cobertura* FC_j , como último indicador del balance de energía extendido.

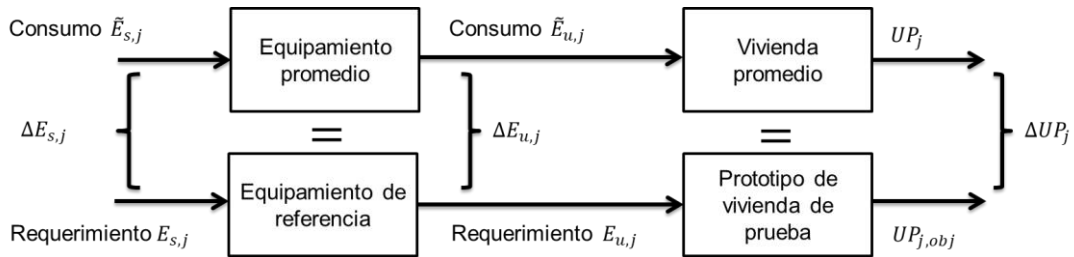


Figura 20: Diferencias entre la unidad de prestación garantizada y la definida (a).

b) *Diferencias entre consumo y requerimiento de energía útil ($\tilde{E}_{u,j} \neq E_{u,j}$).*

La eficiencia del equipamiento es la misma que la del equipamiento de referencia, las características de la vivienda promedio difieren de las características térmicas adoptadas para el prototipo de vivienda de prueba, y la unidad de prestación garantizada coincide exactamente con la definida para la locación (Figura 21). Es decir, para obtener el servicio energético se necesita en este caso más o menos energía útil respecto del modelo teórico pues la vivienda real tiene un comportamiento diferente en relación al prototipo de vivienda de prueba adoptado (e.g. distintos niveles de aislación, diferente hermeticidad de aberturas, mayores o menores superficies de captación de energía solar, etc.).

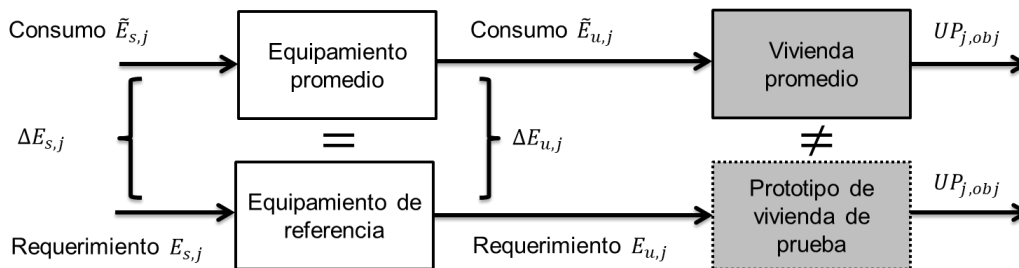


Figura 21: Diferencias entre el consumo y el requerimiento de energía útil (b).

c) *Diferencias entre consumo y requerimiento de energía secundaria ($\tilde{E}_{s,j} \neq E_{s,j}$).*

La eficiencia del equipamiento es diferente del equipamiento de referencia, las características de la vivienda promedio son las adoptadas para el prototipo de vivienda de prueba, y la unidad de prestación garantizada coincide exactamente con la definida para la locación (Figura 22). Es decir, se garantiza la cantidad de servicio

energético definido, el contexto en el cual se utiliza la energía útil es el mismo que el definido, pero los equipos que convierten energía secundaria en energía útil tienen eficiencias diferentes a los de referencia.

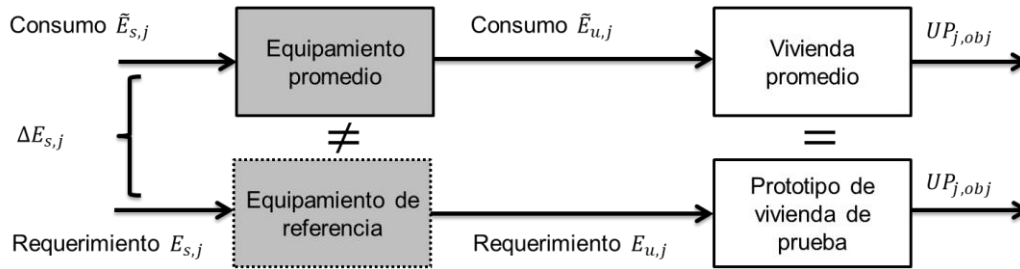


Figura 22: Diferencias entre el consumo y el requerimiento de energía secundaria (c).

Lo que en la realidad sucede es que *las tres causas anteriores estarán presentes*, debiendo realizar un detallado análisis para poder atribuir a cada una de ellas la participación en la diferencia entre el requerimiento de energía secundaria para un uso y el consumo real para dicho uso en una determinada población. Esta desagregación de información es lo que se planteaba en el Capítulo 1 como objetivo y principal logro de esta parte de la metodología. Mediante la descomposición anterior se pueden detectar las verdaderas causas de ineficiencia, e incluso si aún con procesos eficientes se está garantizando el servicio energético que se define necesario para cumplimentar un mínimo estándar.

3.1.6. Balance de Energía Extendido

Dada una población de estudio, entendiendo la población en términos estadísticos, se presenta a continuación el procedimiento de elaboración de las matrices de datos que representan los diferentes flujos de energía secundaria hasta las distintas unidades de prestación, junto con sus posibilidades de procesamiento acorde a los objetivos específicos que se persigan. Esta *cadena* (i.e. desde la energía secundaria hasta la unidad de prestación) luego se *acopla* a las metodologías de balances energéticos tradicionales pudiéndose obtener, mediante un *Análisis Upstream*, el consumo o requerimiento de energía primaria para garantizar la unidad de prestación real o la unidad de prestación definida según se trate. Considerando entonces un uso j particular, cuyo servicio energético está cuantificado por la unidad de prestación UP_j , la Figura 23 presenta el esquema del balance energético extendido, partiendo desde la energía primaria hasta llegar a la unidad de prestación (aunque la última instancia no represente un flujo de energía) y habiendo condensado todas las transformaciones desde la energía primaria hasta la energía secundaria (e.g. tratamiento de gas, centrales térmicas, refinerías, etc.) dentro de un solo bloque llamado Sistema Energético. Tal como se observa en la Figura 23, el balance energético extendido agrega una etapa más a los balances de energía útil, y dos etapas más a los balances de energía neta o secundaria.

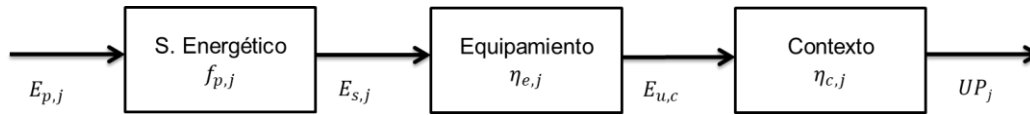


Figura 23: Balance energético extendido.

El balance energético extendido (para el j -ésimo uso) entonces queda caracterizado por las siguientes cantidades:

$E_{p,j}$ requerimiento o consumo de energía primaria del j -ésimo uso.

$E_{s,j}$ requerimiento o consumo de energía secundaria del j -ésimo uso.

$E_{u,j}$ requerimiento o consumo de energía útil del j -ésimo uso.

UP_j unidad de prestación del j -ésimo uso.

$f_{p,j}$ valor característico del sistema energético que representa el factor de conversión de energía secundaria a energía primaria para el tipo de energía o los tipos de energías que se destinan al j -ésimo uso.

$\eta_{e,j}$ valor característico del rendimiento del parque de equipamiento que realiza la conversión de energía secundaria a energía útil para el j -ésimo uso.

$\eta_{c,j}$ valor característico del *rendimiento de contexto* en el que se lleva a cabo la transformación de energía útil a servicio energético para el j -ésimo uso (en el caso de los usos de calefacción y refrigeración este valor condensa las características de prestaciones térmicas de las viviendas).

Finalmente, si el balance energético extendido para el j -ésimo uso se hace para todos los usos finales de un sistema energético, entonces se tendrán matrices de datos que concentren toda la información, para cada uso, y cada energía secundaria distinta, y cada una de las cantidades escalares anteriores se convierten en variables matriciales o vectoriales según se trate, pues existirán múltiples valores escalares para cada una de ellas según el uso y el energético del cual se trate.

El *contexto*, es decir lo que determina la transformación de energía útil en servicio energético, debe definirse para cada uso en particular. Se denomina *rendimiento de contexto* porque si bien la conversión de energía útil en servicio energético no es una conversión energética puede equipararse formalmente a esta. En el caso de calefacción y refrigeración serán las características higrotérmicas de la edificación, mientras que en el caso de iluminación, por ejemplo, el *rendimiento de contexto* estará determinado por el conjunto de características del ambiente que determinen el nivel de confort visual a partir de la energía lumínica que eroguen los artefactos (e.g. reflectancia de paredes y techos, disponibilidad de luz natural, etc.). En los sectores industriales y de transporte, en cambio, el *rendimiento de contexto* de cada uso será determinado por características de los procesos específicos.

- *Determinación del Rendimiento de Contexto*

El rendimiento de contexto $\eta_{c,j}$ para un determinado uso intenta definir una especie de eficiencia o rendimiento similar al de artefactos que convierten energía secundaria en energía útil, pero en este caso relacionando la unidad de prestación que se obtiene a partir de una cierta cantidad de energía útil. En otras palabras, se construye un modelo que formalmente puede asimilarse a cualquier transformación energética pero que en este caso se refiere a un cociente entre servicio energético y energía útil (Figura 24).

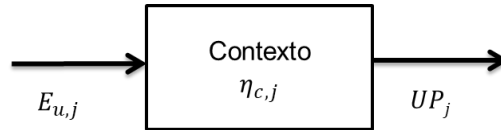


Figura 24: Rendimiento de contexto.

La determinación de los rendimientos de contexto para calefacción $\eta_{c,c}$ y para refrigeración $\eta_{c,r}$ se realizan a partir de una comparación de la vivienda promedio de la localidad estudiada con el prototipo de vivienda de prueba definido. Para poder realizar dicha comparación es necesario conocer las características de una *vivienda promedio* de la población en estudio, que debe ser caracterizada según los parámetros con los que se definió la entidad abstracta prototipo de vivienda de prueba. Una forma sencilla de obtener dichos rendimientos es a través de la relación entre la condición climática (calculada para el prototipo de vivienda de prueba) y la condición climática calculada para la vivienda promedio según se expresa en las expresiones (3.30) y (3.31),

$$\eta_{c,c} = \frac{zc_c}{zc_c(vivienda\ promedio)} \quad (3.30)$$

$$\eta_{c,r} = \frac{zc_r}{zc_r(vivienda\ promedio)} \quad (3.31)$$

donde:

zc_c y zc_r representan las condiciones climáticas de calefacción y refrigeración respectivamente (i.e. las condiciones climáticas calculadas con la vivienda de prueba en la localidad considerada);

$zc_c(vivienda\ promedio)$ y $zc_r(vivienda\ promedio)$ representan las condiciones climáticas de calefacción y refrigeración respectivamente, calculadas con la vivienda promedio.

Si bien las expresiones (3.30) y (3.31) presentan una forma muy sencilla y aplicable para el cálculo de los rendimientos de contexto, las autoridades de aplicación pueden establecer o utilizar otros mecanismos de caracterización de la vivienda promedio siempre que se llegue a un valor adimensional análogo a un rendimiento.

- *Determinación del Rendimiento del Equipamiento*

El rendimiento promedio para el j-ésimo uso ($\eta_{e,j}$) se obtiene a partir de los balances de energía útil tradicionales para cada uso. En caso de que en dichos balances se confiera información respecto del parque de equipamiento directamente se tomará dicho valor, mientras que en el caso de que no se expliciten, entonces se realizará el cociente entre la energía útil y la energía secundaria relacionada con el uso considerado.

- *Ecuaciones del Balance Energético Extendido*

Conociendo los rendimientos de equipamiento y de contexto del j-ésimo uso, establecida la unidad de prestación del j-ésimo uso para una determinada localidad $UP_{j,obj}$ y conociendo el consumo de energía secundaria asociado a dicho uso $\tilde{E}_{s,j}$, entonces es posible calcular la unidad de prestación real, efectivamente garantizada a la población en estudio UP_j , el consumo de energía útil $\tilde{E}_{u,j}$, el factor de cobertura FC_j y el consumo de energía primaria correspondiente $\tilde{E}_{p,j}$, según las expresiones (3.32), (3.33), (3.34) y (3.35).

$$UP_j = \tilde{E}_{s,j} \eta_{e,j} \eta_{c,j} \quad (3.32)$$

$$\tilde{E}_{u,j} = \tilde{E}_{s,j} \eta_{e,j} \quad (3.33)$$

$$FC_j = \frac{UP_j}{UP_{j,obj}} \quad (3.34)$$

$$\tilde{E}_{p,j} = \frac{f_{p,j} UP_j}{\eta_{e,j} \eta_{c,j}} \quad (3.35)$$

Es importante destacar que las expresiones (3.32) y (3.35) asumen un único tipo de energía secundaria (i.e. sólo electricidad, gas, etc. pero no una considerándose una combinación de las mismas). En el caso de que una unidad de prestación sea obtenida a partir de más de una energía secundaria, las eficiencias de equipamiento y el factor de conversión de energía primaria deberán calcularse como promedios ponderados en base a la participación de cada energía secundaria (e.g. sistemas de calefacción operando con gas natural y electricidad a la vez), según las expresiones (3.36) y (3.37),

$$\eta_{e,j} = \frac{1}{\sum_{k=i}^L \frac{\lambda_{k,j}}{\eta_{e,k,j}}} \quad (3.36)$$

$$f_{p,j} = \frac{\sum_{k=i}^L \frac{\lambda_{k,j}}{\eta_{e,k,j}} f_{p,k,j}}{\sum_{k=i}^L \frac{\lambda_{k,j}}{\eta_{e,k,j}}} \quad (3.37)$$

donde:

$\lambda_{k,j}$ representa la parte de la unidad de prestación j que se suministra con la energía secundaria k considerada la participación en energía útil;

$f_{p,k,j}$ es el valor característico del sistema energético que representa el factor de conversión de energía secundaria k a energía primaria;

$\eta_{e,k,j}$ es el rendimiento medio ponderado de los equipos que proporcionan la energía útil para la unidad de prestación j , utilizando la energía secundaria k ;

L es el número de energías secundarias diferentes con las cuales se satisface la unidad de prestación j (e.g. gas, electricidad, carbón, etc.).

El factor de cobertura FC_j refleja la cantidad de servicio energético que efectivamente se garantiza, ya que relaciona la unidad de prestación real con la unidad de prestación definida para la locación en estudio. Factores de cobertura mayores a uno indican que la población estudiada se provee de una mayor cantidad de servicio energético respecto de lo considerado estándar para esa locación, mientras que por el contrario valores inferiores a uno advierten que no se logra garantizar el estándar definido. El factor de cobertura puede interpretarse como un indicador fundamental al momento de evaluar los reales beneficios que se obtienen de un determinado sistema energético, y la comparación de los mismos para distintas locaciones pondrá en evidencia las asimetrías respecto de la satisfacción de necesidades asociadas al uso de la energía. Incluso puede utilizarse como un indicador de pobreza energética, grado de bienestar energético, o de desarrollo energético.

3.2. Acoplamiento entre Calidad de Energía y Exigencia del Servicio Energético

En la Sección 3.1 se instituyó el concepto de unidad de prestación, como cantidad de un determinado servicio energético suministrado, y para ello fue necesaria la adopción de valores de energía útil como modo de cuantificar un concepto que intrínsecamente es subjetivo. En otras palabras, para poder establecer una definición de algo cualitativo fue necesario asignarle un valor cuantitativo, particularmente de energía útil. Así, la unidad de prestación quedó determinada por la *cantidad* de energía útil necesaria para garantizar un nivel de confort pre-establecido bajo ciertas condiciones, pero nada se explicitó respecto de la *calidad* que debía tener dicha energía útil. Resulta apropiado entonces avanzar en la caracterización de esta unidad de prestación, no sólo en términos de la *cantidad* de energía útil que requeriría un determinado proceso de referencia para lograrla, sino también en términos de la *calidad* que debería tener dicha energía. Como medida de la calidad de un cierto flujo energético, se recurre al concepto de exergía, que ya fue presentado en el Capítulo 2.

Se desarrolla en la presente Sección una propuesta para cuantificar el nivel de *exigencia* de una definida unidad de prestación, para luego interpelar respecto de si en la práctica dicha exigencia se condice con la *calidad* de la energía útil y secundaria utilizada para satisfacerla. De lo expuesto en el Capítulo 2, se desprende que con un flujo energético de *alta exergía* se pueden satisfacer unidades de prestación de *poca exigencia*, no existen problemas para ello, pero esto comportaría *un derroche de calidad*, mientras que por el contrario, sí existen impedimentos físicos para satisfacer una demanda *muy exigente* con un flujo energético de *poca calidad*. Por lo tanto, en la planificación de un sistema energético eficiente desde el punto de vista termodinámico sería una estrategia responsable *reservar los energéticos de calidad* (i.e. con alto contenido exergético) *a las demandas exigentes y satisfacer demandas poco exigentes con energéticos de baja calidad*.

3.2.1. Exigencia de la Unidad de Prestación

Se define la *exigencia* de la unidad de prestación j EUP_j , como el *mínimo contenido exergético relativo de la energía útil, necesario para lograr la unidad de prestación bajo condiciones preestablecidas y para un determinado ambiente de referencia* (Figura 25), y se calcula según la expresión (3.38),

$$EUP_j = \frac{Ex(UP_j)}{UP_j} \quad (3.38)$$

donde:

$Ex(UP_j)$ es el mínimo contenido exergético de la energía útil que se necesita para proporcionar la unidad de prestación j (kWh);

UP_j es la unidad de prestación j .

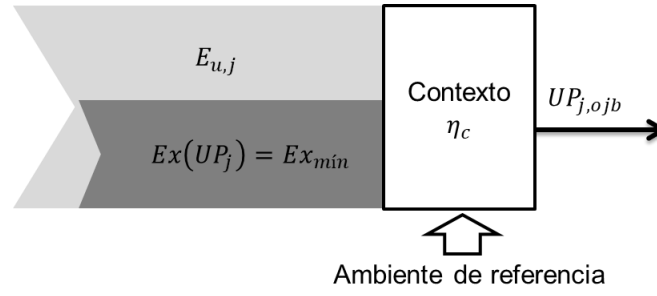


Figura 25: Exigencia de la unidad de prestación j.

La definición anterior se deriva de la definición dada en la Sección 3.1 para unidad de prestación, con la diferencia que en vez de considerar valores de energía considera valores de exergía. Una sustancial diferencia también radica en la necesidad de establecer el ambiente de referencia, dato necesario para poder determinar la exergía de un flujo energético. La exigencia de una unidad de prestación es un indicador relativo, cuyo rango de variación estará entre 0 y 1: unidades de prestación muy exigentes presentarán valores cercanos a 1 mientras que unidades de prestación poco exigentes presentarán valores cercanos a 0.

- *Exigencia de las unidades de prestación de calefacción y refrigeración*

A partir de un método sencillo de análisis exergético para estudiar los sistemas de calefacción propuesto por Tronchin y Fabbri, la exigencia de la unidad de prestación de calefacción se define según la expresión (3.39) (Tronchin y Fabbri, 2008),

$$EUP_c = \frac{Ex(UP_c)}{UP_c} = \frac{UP_c}{UP_c} \left(1 - \frac{\theta_{min}}{\theta_{conf}} \right) = \left(1 - \frac{\theta_{min}}{\theta_{conf}} \right) \quad (3.39)$$

donde:

θ_{conf} es la temperatura de confort de calefacción adoptada para la definición de la unidad de prestación (K);

θ_{min} es la temperatura mínima absoluta del clima considerado (K).

Mientras que la exigencia de la unidad de prestación de refrigeración se define según la expresión (3.40),

$$EUP_r = \frac{Ex(UP_r)}{UP_r} = \frac{UP_r}{UP_r} \left(1 - \frac{\theta_{conf}}{\theta_{max}} \right) = \left(1 - \frac{\theta_{conf}}{\theta_{max}} \right) \quad (3.40)$$

donde:

θ_{conf} es la temperatura de confort de refrigeración adoptada para la definición de la unidad de prestación (K);

θ_{max} es la temperatura máxima del clima considerado (K).

3.2.2. Calidad de los Flujos de Energía

Luego de haber caracterizado la *exigencia* de la prestación mediante la expresión (3.38), es entonces necesario definir la *calidad* de los flujos de energía que se utilizan para proveer dichas unidades de prestación, y así poder luego ver la relación existente entre calidad de los flujos y la exigencia de las prestaciones. La calidad de los flujos de energía se determinará según el contenido exergético relativo de cada flujo, abordando el estudio únicamente para flujos de energía útil y energía secundaria que se consideran en el presente trabajo.

- *Contenido de exergía en flujos de energía útil*

La Figura 26 exhibe la energía útil y su contenido exergético saliente de un artefacto.

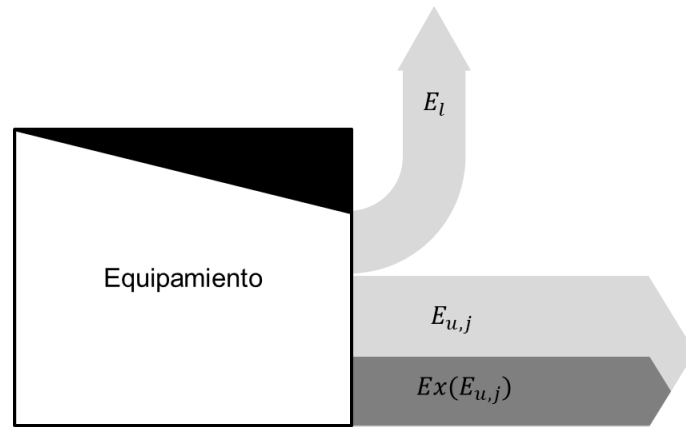


Figura 26: Contenido exergético de flujos de energía útil.

En el caso en que la energía útil sea *energía térmica*, es decir un equipo que erogare calor, sea de uso industrial o residencial, su contenido exergético se define según la expresión (3.41),

$$Ex(Eu) = Eu \left(1 - \frac{\theta_{min}}{\theta_{erog}} \right) \quad (3.41)$$

donde:

θ_{erog} es la temperatura de erogación del equipamiento que proporciona el flujo de energía térmica (K);

θ_{min} es la temperatura mínima del clima considerado (K).

En caso de tratarse de energía frigorífica, es decir si se pretende quitar energía térmica de ambientes o cámaras refrigeradas, entonces la expresión (3.41) se convierte en (3.42),

$$Ex(Eu) = Eu \left(1 - \frac{\theta_{ev}}{\theta_{ext}} \right) \quad (3.42)$$

donde:

θ_{ev} es la temperatura del evaporador de las máquinas frigoríficas que puede asimilarse a la temperatura de foco frío (K);

$\theta_{m\acute{a}x}$ es la temperatura máxima del clima considerado (K).

En este caso, se considera la energía térmica que se extrae del ambiente refrigerado, y su exergía se calcula considerando el trabajo mecánico que pudiera realizarse en condiciones ideales, asumiendo como temperatura de foco caliente la temperatura exterior θ_{ext} y como foco frío la temperatura del evaporador θ_{ev} .

En el caso de que la energía útil sea trabajo mecánico, la exergía correspondiente será la totalidad del flujo energético tal como se observa en la expresión (3.43).

$$Ex(Eu) = Eu \quad (3.43)$$

Se brindan solamente modelos teóricos de definición de contenido exergético de flujos calóricos y de trabajo mecánico, pues el objetivo de estas definiciones es aplicar a los casos particulares de calefacción y refrigeración. Los contenidos exergéticos de flujos materia y energía en general exceden el presente trabajo, sugiriéndose literatura especializada para tales fines (Bejan, 2016).

- *Contenido de Exergía en Flujos de Energía Secundaria*

Respecto del contenido exergético de los flujos de energía secundaria, tal como se esquematiza en la **Figura 27**, se considerará el contenido exergético de la energía entrante a equipos de conversión. Si se trata de electricidad se considera el cien por ciento de la energía como exergía, pues idealmente toda la electricidad puede convertirse en trabajo mecánico para cualquier ambiente de referencia. Para la determinación de la exergía química de combustibles, existen métodos analíticos que se encuentran en literatura específica (Moran y Sciubba, 1994; Morris y Szargut, 1986; Szargut, 2005, 1989). En el caso de combustibles líquidos y sólidos, Song et al. presentan una correlación unificada para su cálculo a partir del contenido de hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno, etc. (Song et al., 2012). A los fines del presente trabajo, para definir la exergía de un combustible se propone el factor β de Szargut, que se define como la relación entre la exergía química y el poder calorífico de un combustible según la expresión (3.44),

$$\beta = \frac{Ex_{quím}}{HV} \quad (3.44)$$

donde:

HV poder calorífico inferior expresado en unidades de energía sobre unidades de masa o de volumen;

$Ex_{quím}$ exergía química del recurso energético considerado.

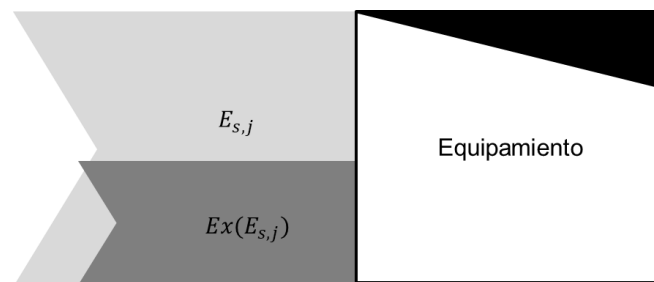


Figura 27: Contenido exergético de flujos de energía secundaria.

En la Tabla 8 (Rocco et al., 2014a) se pueden observar los valores de β para distintos recursos energéticos, pudiéndose estimar de manera sencilla el contenido exergético de un combustible, conforme la relación (3.44).

Tabla 8: β de Szargut para distintas fuentes de energía.

Categoría	Recurso	Unidades	HV	$Ex_{quím}$	β
Fósil	Carbón mineral	MJ/m ³	9,9	10,3	1,04
	Carbón pesado	MJ/m ³	19,1	19,7	1,03
	Gas de minas	MJ/m ³	39,8	37,4	0,94
	Gas natural	MJ/m ³	38,3	36	0,94
	Petróleo crudo	MJ/m ³	45,8	46,5	1,02
	Turba	MJ/m ³	9,8	10,3	1,05
Nuclear	Uranio	MJ/m ³	560000	560000	1,00
Biomasa	Leña de alta densidad	MJ/m ³	1270	13377	10,53
	Leña de baja densidad	MJ/m ³	9180	9639	1,05

3.2.3. Acoplamiento Calidad Exigencia

Luego de haber definido la exigencia de la prestación como el mínimo contenido exergético de la energía útil necesario para obtenerla, y la calidad de los flujos de energía útil y energía secundaria, entonces se presentan dos indicadores de acoplamiento de calidad. El primero de ellos relaciona la calidad de la energía útil con la exigencia de la prestación, y el segundo relaciona la calidad de la energía neta con la exigencia de la prestación.

- *Acoplamiento de calidad entre energía útil y exigencia de la prestación*

Se define el *índice de acoplamiento calidad de la energía útil y exigencia de la prestación* ε_u para un caso real de uso de energía, como el cociente entre la exigencia de una determinada prestación (EUP_j) y el contenido exergético relativo de la energía útil que en la práctica se utiliza para tal fin $Ex(Eu)/Eu$, según la expresión (3.45),

$$\varepsilon_u = \frac{EUP_j}{\frac{Ex(E_{u,j})}{E_{u,j}}} \quad (3.45)$$

donde:

EUP_j es la exigencia de la prestación j ;

$Ex(E_{u,j})$ es el contenido exergético de la energía útil que se suministra para obtener la prestación j ;

$E_{u,j}$ es la energía útil que se suministra para obtener la prestación j .

La definición anterior es conceptualmente análoga a la eficiencia racional propuesta por Kotas (1985) y detallada en el Apartado 2.3.2, pero no calculada en términos absolutos como cocientes de exergías sino como cocientes de *exergías relativas*. Y lo que se llama *exergía deseada* o *energía objetivo* en la formulación de Kotas, en este caso sería la exigencia de la unidad de prestación j (EUP_j).

La Figura 28 muestra un esquema simbolizando el grado de acoplamiento entre la calidad de la energía útil y la exigencia de la prestación. En la misma se observa que el contenido exergético relativo a la salida del equipamiento es mayor al requerido por la prestación, por lo que existe una degradación de la calidad en el sentido de que se hubiera podido satisfacer la unidad de prestación con energía útil de *menor calidad*. Un ejemplo de este caso podría ser la calefacción de ambientes mediante calefactores con focos de intercambio a altas temperaturas.

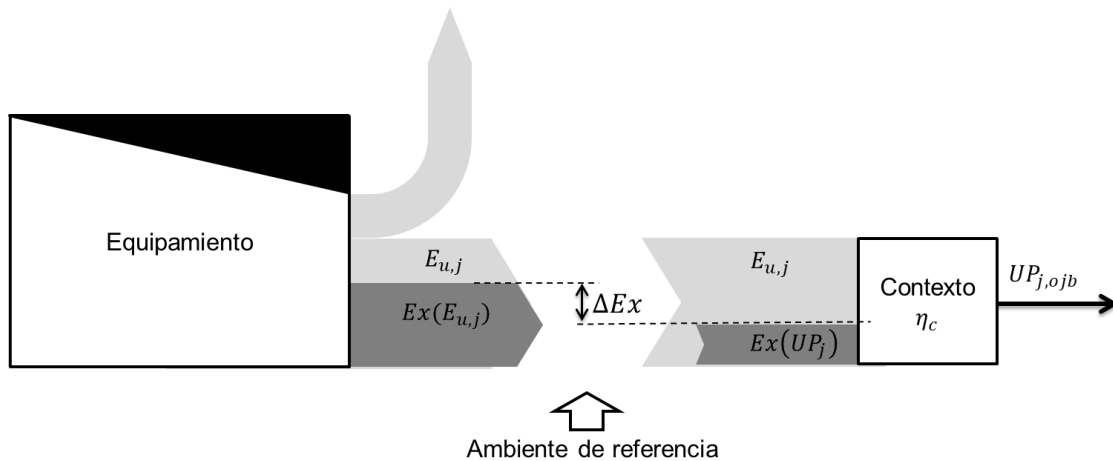


Figura 28: Acoplamiento de calidad de energía útil y exigencia de la prestación.

La relación entre calidad y exigencia será exactamente igual a 1 en el caso de que la energía útil que se esté utilizando posea el mínimo contenido de exergía necesario para poder garantizar la prestación ($\Delta Ex = 0$), tal como se definió en los párrafos anteriores. Si bien en condiciones ideales se puede llegar al valor 1, en condiciones reales esto es imposible. A modo de ejemplo, en un sistema de calefacción la exergía mínima necesaria para garantizar la temperatura de confort debiera calcularse a partir del Teorema de Carnot considerando la temperatura de confort como temperatura de foco caliente. Ahora en la práctica, si se

pretende calefaccionar un ambiente a una temperatura de confort, y la temperatura de erogación de los equipos sea la misma temperatura de confort, eso implicaría una superficie de intercambio infinita. No obstante, y sin perder de vista las limitaciones prácticas de este indicador, el mismo exhibe de forma clara la degradación de calidad que sucede en los procesos de conversión de energía útil en servicio energético. De todos modos, no queda descartada la posibilidad de que se defina un valor arbitrario como numerador en el límite de Carnot, más asociado a sistemas reales, dejando esto a criterio de quien implemente el método.

- *Acoplamiento de calidad entre energía secundaria y exigencia de la prestación*

En la mayoría de las aplicaciones es también interesante definir una relación entre la calidad de la energía secundaria y la exigencia de la unidad de prestación. Este tipo de enfoque es más fácil incluso de acoplar con balances energéticos tradicionales que generalmente terminan en flujos de energía secundaria. Para definir este indicador, debe considerarse un proceso de conversión de energía secundaria en unidad de prestación que es equivalente a dos procesos en cascada (i.e. conversión de energía secundaria en energía útil y posterior conversión de energía útil en unidad de prestación). En este caso entonces, el *acoplamiento calidad de la energía secundaria y exigencia de la prestación* ε_s queda definido según la expresión (3.46),

$$\varepsilon_s = \frac{EUP_j}{\frac{Ex(E_{s,j})}{E_{s,j}}} \quad (3.46)$$

donde:

EUP_j es la exigencia de la prestación j ;

$Ex(E_{s,j})$ es el contenido exergético del vector energético (i.e. energía secundaria) que proporciona la prestación considerada;

$E_{s,j}$ es el vector energético que se suministra para obtener la prestación j .

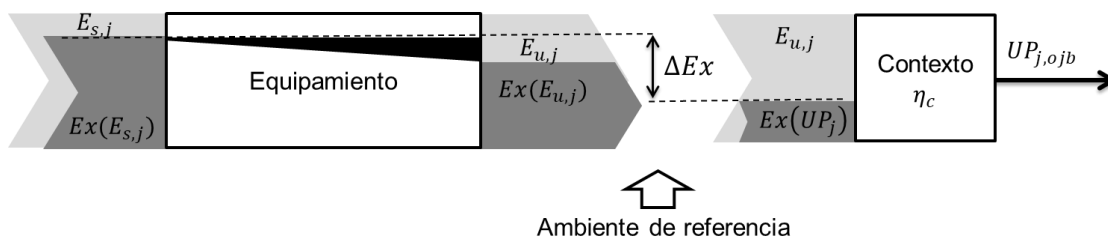


Figura 29: Acoplamiento de calidad de energía secundaria y exigencia de la prestación.

La Figura 29 esquematiza la relación entre la exergía necesaria para lograr la prestación propuesta y la exergía que contiene la energía secundaria. Al igual que en el caso de la energía útil, también el indicador de acoplamiento asumirá valores entre 0 y 1 y nuevamente podrá advertirse gracias a este análisis que en ocasiones se utilizan energéticos de altísima calidad para satisfacer servicios energéticos poco exigentes (e.g. calefacción de ambientes utilizando energía eléctrica mediante efecto Joule).

3.3. Evaluación del Impacto Global de Intervenciones en el Uso Final de Energía

En la presente Sección se detallan los procedimientos para determinar el impacto en energía primaria producto de garantizar una determinada prestación j , además de estudiar cómo varía dicho impacto cuando se realizan intervenciones de eficiencia energética en usos finales. En primer lugar, se calcula el consumo o requerimiento (según se trate) de energía primaria asociado a la provisión de una prestación j mediante un Análisis *Upstream* (aguas arriba) en el balance energético extendido. Este método es de muy sencilla aplicación, pero sólo contabiliza efectos directos, (i.e. la energía primaria que al final del balance se convierte en unidad de prestación) pero sin considerar la energía embebida en los bienes y servicios necesarios para que el sistema energético funcione (e.g. acero para cables, máquinas, etc.). Luego, acoplando el balance energético extendido con un modelo IO, se propone una forma superadora para la evaluación de impacto global, pero a la vez más compleja. Se determina el costo energético de una prestación j y el impacto en el mismo producto de intervenciones de eficiencia en los sectores de consumo final de energía. En este segundo caso, al hablar de costo energético primario, se están considerando no solamente los flujos energéticos entrantes al balance sino también los consumos de energía primaria indirectos ocasionados por el consumo de bienes y servicios, tanto para que el sistema energético funcione como también para llevar a cabo intervenciones de eficiencia en el uso final. En síntesis, en esta Sección se calcularán:

- a) El consumo o requerimiento de energía primaria asociado a la prestación j .
- b) El costo energético primario de suministrar una prestación j .
- c) La variación del costo energético primario de suministrar una prestación j luego de realizar intervenciones de eficiencia energética en el uso final (o el nuevo costo energético primario de la unidad de prestación).

3.3.1. Análisis Upstream del Balance Energético Extendido

Esta forma de análisis, consiste básicamente en ir *aguas arriba* en el balance energético extendido, partiendo de la unidad de prestación y llegando a la energía primaria. Dada su sencillez y la poca demanda de datos para su aplicación, puede ser un método adecuado para calcular variaciones en recursos primarios, pero solamente si las reducciones en el consumo se dan por variaciones en la prestación dada y no por intervenciones tecnológicas que comporten variaciones de consumo de energía en otros sectores de consumo final. A su vez, dichas modificaciones en las estructuras de consumo final deben ser marginales de manera de no requerir cambios en las estructuras de abastecimiento, pues de suceder esto, los valores que caracterizan la cadena de suministro (e.g. eficiencia media de conversión, transporte, etc.) se verían alterados.

Consumo de Energía Primaria de la Unidad de Prestación

Suponiendo que se designa como UP_j a la unidad de prestación j efectivamente garantizada a una cierta población, y como $UP_{j,obj}$ a la unidad de prestación j definida para la locación dada, entonces la variación que en la unidad de prestación suministrada se expresa como la diferencia entre ambas, según la expresión (3.47).

$$\Delta UP_j = UP_{j,obj} - UP_j \quad (3.47)$$

Luego las variaciones del consumo de energía útil $\Delta \tilde{E}_{u,j}$, energía secundaria $\Delta \tilde{E}_{s,j}$ y energía primaria $\Delta \tilde{E}_{p,j}$ ocasionadas por la variación en la prestación j suministrada se calculan según las expresiones (3.48), (3.49) y (3.50) respectivamente,

$$\Delta \tilde{E}_{u,j} = \frac{1}{\eta_{c,j}} \Delta UP_j \quad (3.48)$$

$$\Delta \tilde{E}_{s,j} = \sum_{k=1}^L \frac{\lambda_{k,j}}{\eta_{e,k,j} \eta_{c,j}} \Delta UP_j \quad (3.49)$$

$$\Delta \tilde{E}_{p,j} = \sum_{k=1}^L \frac{f_{p,k} \lambda_{k,j}}{\eta_{e,k,j} \eta_{c,j}} \Delta UP_j \quad (3.50)$$

donde:

$\lambda_{k,j}$ representa la parte de la unidad de prestación j que se suministra con la energía secundaria k considerada la participación en energía útil;

ΔUP_j es la variación de la unidad de prestación del j -ésimo uso;

$f_{p,k}$ es el valor característico del sistema energético que representa el factor de conversión de energía secundaria k a energía primaria;

$\eta_{e,k,j}$ es el rendimiento medio ponderado de los equipos que proporcionan la energía útil para la unidad de prestación j , utilizando la energía secundaria k ;

$\eta_{c,j}$ es el rendimiento de contexto en el que se lleva a cabo la transformación energía útil en unidad de prestación j ;

L es el número de energías secundarias diferentes con las cuales se satisface la unidad de prestación j (e.g. gas, electricidad, carbón, etc.).

Si bien es considerado que ΔUP_j es la variación en la unidad de prestación suministrada para llegar a la unidad de prestación definida, en realidad puede ser cualquier variación entre dos valores de prestación considerados, incluso puede partirse de que la prestación otorgada es mayor a la definida para el lugar, y en ese caso la variación sería negativa. En cualquier caso lo que se llamó $UP_{j,obj}$ puede referirse a la unidad de prestación definida para la localidad o a cualquier otra que se pretenda.

Este sencillo método también puede aplicarse en aquellos casos en que además se produzcan variaciones en el rendimiento de equipamientos $\eta_{e,j}$ y/o rendimientos de contexto $\eta_{c,j}$ *sin que esto implique un mayor consumo de bienes o servicios para generar estos cambios* (i.e. intervenciones gestionales que mejoren la eficiencia de equipos y del contexto pero sin necesidad de utilizar bienes o servicios producidos por otros sectores de la economía, e.g. mantenimiento) o que produzca una sustitución de fuentes $\lambda_{k,j}$ (e.g. cambiar la participación relativa de las distintas energías secundarias), entonces las variaciones en el consumo de energía útil, secundaria y primaria adquirirán la forma de las expresiones (3.51), (3.52) y (3.53),

$$\Delta \tilde{E}_{u,j} = \frac{UP_{j,obj}}{\eta'_{c,j}} - \frac{UP_j}{\eta_{c,j}} \quad (3.51)$$

$$\Delta \tilde{E}_{s,j} = \sum_{k=i}^L \left(\frac{\lambda'_{k,j} UP_{j,obj}}{\eta'_{e,j} \eta'_{c,j}} - \frac{\lambda_{k,j} UP_j}{\eta_{e,j} \eta_{c,j}} \right) \quad (3.52)$$

$$\Delta \tilde{E}_{p,j} = \sum_{k=i}^L f p_k \left(\frac{\lambda'_{k,j} UP_{j,obj}}{\eta'_{e,j} \eta'_{c,j}} - \frac{\lambda_{k,j} UP_j}{\eta_{e,j} \eta_{c,j}} \right) \quad (3.53)$$

donde:

$\lambda'_{k,j}$ representa la parte de la unidad de prestación j que se suministra con el energético k luego de la intervención, considerada la participación en energía útil;

$\eta'_{e,j}$ es el rendimiento medio ponderado de los equipos que proporcionan la energía útil para la unidad de prestación j , utilizando la energía secundaria k , luego de realizada la intervención;

$\eta'_{c,j}$ es el rendimiento de contexto en el que se lleva a cabo la transformación energía útil en unidad de prestación j , luego de realizada la intervención.

El resultado de la expresión (3.53) es análogo al obtenido en (3.35), pues no es más que la conversión a energía primaria de los flujos de energía secundaria. Si bien esto no constituye un costo energético de la prestación j , es un resultado importantísimo y de muy fácil obtención.

3.3.2. Análisis IO

En la expresión (3.53), recientemente obtenida, se contabilizan las variaciones de energía primaria ocasionadas por intervenciones de eficiencia energética en usos finales, estas intervenciones pueden ser variaciones en la unidad de prestación suministrada (e.g. una intervención de uso racional de energía), cambios en los rendimientos de equipamiento y de contexto, o sustitución de fuentes. Dicha expresión, como se aclaró oportunamente, sólo considera los ahorros de energía primaria producto de ahorros en el consumo, pero: (a) no contabiliza los consumos indirectos del sistema energético (e.g. cables, centrales y todos aquellos consumos de materiales y servicios por parte de los sectores de producción, transporte y distribución necesarios para garantizar el energético en el uso final); y (b) no permite contabilizar las variaciones de energía primaria ocasionada por el mayor consumo de energía para producir bienes y servicios necesarios

para las intervenciones en la etapa de uso final, por lo que su aplicación para estudiar una intervención tecnológica (i.e. que implique un cambio tecnológico como sustitución de artefactos, cambios en el contexto que impliquen materiales, etc.) no resultaría adecuada. Es decir la expresión (3.53) no considera el aumento en el consumo de energía de otros sectores, necesario para proveer de energías secundarias a los usuarios finales como asimismo sustanciar las intervenciones de eficiencia energética en usos finales. Es por esto que en (3.53) se habló de *variación de energía primaria* o *consumo de energía primaria asociada a una unidad de prestación j* y no se refirió al costo energético de la unidad de prestación j , pues el costo energético debe considerar (según la delimitación espacial y temporal que se defina) no solo el flujo energético necesario sino la energía indirecta o embebida en materiales necesarios para que existan los flujos.

La metodología que se detalla a continuación, basada en el modelo Input-Output, permite entonces contabilizar estos efectos indirectos, por lo tanto, en este apartado se definirá el *costo en energía primaria de la unidad de prestación j* . Como se anticipó en el Capítulo 2, el modelo IO a utilizar estará basado en el enfoque producto-industria oportunamente fundamentado y la contabilización de costos energéticos se hará basada en el consumo. Para la construcción de este modelo y su empalme con el balance energético extendido deben definirse las siguientes características y premisas.

a) *Tipo de intervenciones a evaluar*

Se considera que las intervenciones a evaluar serán de *impacto* o *shock* y aplicadas exclusivamente al sector residencial, sector de *consumo final en términos energéticos*, y también de *consumo final en términos económicos*, por lo que los cambios en energía neta debido a las intervenciones se deben imputar en el vector $\mathbf{e}$, como se mostró en la expresión (2.84) del Apartado 2.4.4. En el caso de querer considerar intervenciones de eficiencia en sectores que se consideran de consumo final para el balance energético pero constituyen un sector intermedio para el modelo IO (e.g. industria, comercio, transporte, agropecuario), la metodología de evaluación de impacto sería otra, pues será necesario introducir modificaciones en los coeficientes técnicos de las matrices de uso y de producción, según la expresión (2.86) del Apartado 2.4.4.

b) *Definición de ventana temporal de análisis*

Se evalúa solamente el costo energético de suministrar la prestación j pero no de otros bienes o servicios no energéticos necesarios para tal fin en el proceso final de conversión de energía útil en servicio energético. A modo de ejemplo, si se tratara de la unidad de prestación de calefacción, sólo se evaluará el caso de proveer energía térmica pero no se considerará proveer materiales para la construcción de las habitaciones o acero para la construcción de las estufas, pues se asume que dicho costo energético ya fue realizado. *Es decir*, se *parte de una hipótesis de infraestructura pre-existente*, por lo que se define una ventana temporal de análisis. Este postulado constituye una hipótesis simplificatoria, que bien podría obviarse pues el modelo IO permite considerar también los costos energéticos iniciales pero habría que tener la suficiente consideración al decidir qué parte de los costos iniciales efectivamente se asignan a la prestación j y no a otras (e.g. la construcción de una vivienda no sólo se hace para brindar el servicio energético de calefacción o refrigeración sino para

brindar muchos servicios incluso más importantes, y no energéticos como habitación, privacidad, seguridad, etc.).

c) *Acoplamiento del vector de demanda final con el balance energético extendido*

Para poder acoplar las variaciones en la demanda de energía secundaria con el modelo IO es necesario entender cuál es la variación porcentual en los flujos monetarios que un determinado sector de demanda final (utilizando la demanda en términos del modelo IO, i.e. demanda de productos) realiza del producto i bajo el cual se agrupa el suministro de la energía secundaria considerada. Para ello se parte de las dos hipótesis siguientes:

- Una variación porcentual en el consumo de energía implica la misma variación porcentual en los flujos monetarios desde la demanda final al producto (linealidad).
- Se considera que el producto engloba solamente el suministro del energético considerado, o en algunos casos varios energéticos, pero nunca un energético y otro producto no energético.

Es pertinente realizar dos aclaraciones relativas a la nomenclatura utilizada y al lenguaje. En este punto un balance energético se acopla con un modelo IO de tipo económico. En el balance energético los flujos son de energía, mientras que en el modelo IO los flujos son monetarios, y se hace una equivalencia por la hipótesis de linealidad presentada en el Capítulo 2 y explicitada recientemente. La expresión *demanda final* del modelo IO representa los valores monetarios de los productos energéticos que exclusivamente se *venden* a los sectores económicos de consumo final y no a los sectores intermedios (i.e. industrias, comercios, etc.), es decir las ventas totales de electricidad, gas natural, gas envasado, naftas, etc. Esta expresión no debe confundirse con el *consumo final* de un balance energético, lo que hace referencia a las energías secundarias que consumen los cinco sectores. Cada elemento del vector e representa las ventas totales del producto i del modelo IO, por lo tanto en un primer paso deben identificarse cuáles de dichos productos representan energías secundarias para los usuarios finales (e.g. distribución de electricidad, distribución de gas, etc.).

d) *Construcción del vector de energía extraída*

La asignación de recursos energéticos se puede hacer de dos formas distintas. Owen, et. al. (2017) realizan una exhaustiva comparación considerando dos metodologías distintas de asignación de recursos energéticos a un Modelo IO ordinario para el caso del Reino Unido utilizando como insumos de datos energéticos los provistos por la Agencia Internacional de la Energía. Un primer método consiste en construir el *vector de energía extraída* R a partir de la oferta total de energía primaria (*TPES*) y asignar dichos valores a los recursos fósiles al sector extractivo (*correspondiente a la industria Mining & Quarrying*). El segundo método en cambio propone la construcción de un *vector de energía utilizada* y lo asigna a los distintos sectores de uso final de la energía. En este segundo método se deben utilizar datos por fuera del balance energético para ver cómo distribuir las energías secundarias a los diferentes sectores de consumo, y ello además de significar una complejidad adicional respecto del primer método implica involucrar datos adicionales al modelo que en muchos casos pueden no estar disponibles. Adoptando entonces el primer método descripto, y acoplando al

Modelo IO que se desarrolló en el Capítulo 2, lo que se llamó matriz de recursos exógenos $\mathbf{R}$ para esta aplicación específica se convierte en el vector *energía extraída* $\mathbf{R}$ ($1 \times n$) (pues sólo se considera un recurso exógeno, el de energía primaria), en donde cada elemento R_i toma el valor de energía primaria que el sector i *extrae* o *aprovecha* según se trate de recursos fósiles o flujos renovables respectivamente. En el presente, se hace siempre referencia a *recursos energéticos totales* (i.e. los recursos energéticos se contabilizan independientemente de su carácter fósil o renovable), pero la autoridad que aplique estos procedimientos puede optar por considerar sólo recursos fósiles o no renovables. En este caso, bastará con construir el vector *de energía extraída* sólo contabilizando los recursos que se quieren estudiar.

Costo Energético Primario de la Unidad de Prestación

Para calcular el costo energético primario de una unidad de prestación j se introduce una variación en el consumo final de las energías secundarias que la proporcionan en el modelo IO y luego se observan las variaciones en el consumo de recursos según las formulaciones realizadas en el Capítulo 2. La variación de la prestación consiste en dejar de suministrarla, por lo tanto ΔUP_j *será el valor opuesto a la unidad de prestación que se proporciona a la población en estudio*, sea esta la realmente suministrada o la definida para la localidad. Es decir, $\Delta UP_j = -UP_j$ ó $\Delta UP_j = -UP_{j,obj}$ según se quiera calcular el costo de la unidad de prestación definida o el costo de la unidad de prestación realmente suministrada.

La variación de energía secundaria k asociada a la prestación j está dada por la expresión (3.54),

$$\Delta \tilde{E}_{s,k,j} = \frac{\lambda_{k,j} \Delta UP_j}{\eta_{e,k,j} \eta_{c,j}} \quad (3.54)$$

donde:

$\lambda_{k,j}$ representa la parte de la unidad de prestación j que se suministra con el energético k , considerada la participación en energía útil;

ΔUP_j representa la variación en la unidad de prestación j suministrada;

$\eta_{e,k,j}$ representa el rendimiento del equipamiento o el conjunto de equipamientos que proporcionan la energía útil para satisfacer la unidad de prestación j utilizando el energético k ;

$\eta_{c,j}$ representa el rendimiento de contexto en la transformación de energía útil a unidad de prestación j .

Luego, la variación total de energía secundaria asociada a la prestación j $\Delta E_{sec,j}$ se calcula como la suma de las variaciones para cada energía secundaria según la expresión (3.55),

$$\Delta \tilde{E}_{s,j} = \sum_{k=i}^L \Delta \tilde{E}_{s,k,j} \quad (3.55)$$

donde L es el número total de energías secundarias distintas que con las cuales se proporciona la unidad de prestación j .

La expresión (3.55) se brinda sólo a los efectos de presentar una formalización completa, pues poca utilidad práctica tiene sumar diferentes energías secundarias que naturalmente tienen distinta calidad y requiere cada una de ellas para su producción diferente cantidad de energía primaria.

Se define entonces la variación relativa del consumo de la energía secundaria $\Delta p_{k,j}$ como la variación de consumo de energía producto de alterar el suministro de la prestación (anularla en este caso) respecto del total de consumo de dicha energía secundaria por el sector residencial de la energía secundaria k , según la expresión (3.56),

$$\Delta p_{k,j} = \frac{\Delta \tilde{E}_{s,k,j}}{\tilde{E}_{s,k,res}} \quad (3.56)$$

donde:

$\tilde{E}_{s,k,j}$ representa la cantidad de energía secundaria k que se asigna a la unidad de prestación j ;

$\tilde{E}_{s,k,res}$ representa el consumo residencial per cápita de la energía secundaria k .

Las expresiones (3.54), (3.55) y (3.56) se obtienen a partir de datos del balance energético extendido, pero todavía no han sido acoplados estos datos a los datos del modelo IO. Para lograr el *acoplamiento* con el modelo IO debe identificarse el producto i que representa la energía secundaria k , como se realiza a continuación.

En el caso de que el producto i del modelo IO se corresponda con la energía secundaria k , entonces la variación absoluta en la demanda final del producto i $\Delta e_{i,j}$ ocasionada por la variación en el suministro de la unidad de prestación j , se calcula según la expresión (3.57),

$$\Delta e_{i,j} = +\Delta p_{k,j} e_{i,res} \quad (3.57)$$

donde $e_{i,res}$ representa la demanda final del producto i por parte del sector residencial, mientras que en todos los otros productos que no representen energías secundarias, será

$$\Delta e_{i,j} = 0 \quad (3.58)$$

La utilización de dos sub-índices distintos i, k se debe a que pueden presentarse los casos en que algunas energías secundarias k estén desagregadas en el balance de energía y estén agregadas como un mismo producto i en el modelo IO (e.g. gas envasado, kerosene y derivados de refinerías). De suceder esto, sería imposible establecer una relación biunívoca entre una energía secundaria k y un producto i según las hipótesis anteriormente formuladas, por lo que sería necesario agrupar diferentes energías secundarias en el balance energético.

Una vez determinado el vector variación de demanda final ($\Delta \mathbf{e}$) mediante las expresiones (3.57) y (3.58), las variaciones en el *vector de costo energético primario total* $\Delta \mathbf{C}_{CB}$ se obtiene a través de la expresión (3.59), según fue formulado en el Apartado 2.4.4.

$$\Delta \mathbf{C}_{CB} = \mathbf{r} \mathbf{L}_{PI} \widehat{\Delta \mathbf{e}} \quad (3.59)$$

Al sumar todos los elementos de dicho vector y dividir por el número de habitantes N conforme la expresión (3.60), se obtiene la variación de energía primaria *ingresante* al sistema para dejar de satisfacer una unidad de prestación UP_j , ergo la variación del costo energético primario.

$$\Delta C_{p,UP_j} = \frac{1}{N} \Delta \mathbf{C}_{CB} \mathbf{i} \quad (3.60)$$

Luego, anteponiendo un signo menos en la fórmula (3.60) se obtiene *el costo de energía primaria de la unidad de prestación j* , o dicho en otros términos *el costo energético primario de la prestación j* (3.61).

$$C_{p,UP_j} = -\Delta C_{p,UP_j} \quad (3.61)$$

El costo energético primario de la prestación j recientemente calculado (3.61), y a diferencia de la expresión (3.35) obtenida, no sólo cuantifica la energía primaria que será convertida en electricidad, gas o el vector final que fuere, sino también los consumos indirectos asociados a los bienes y servicios que el sector de producción, transporte y distribución de energía en cualquiera de sus formas necesita. Por eso, con el objetivo de mantener un orden en la nomenclatura el resultado de (3.61) se designó como costo energético mientras en que en (3.35) sólo se refirió a consumo de energía primaria asociado a la unidad de prestación j .

El resultado de la expresión (3.61) indica el costo energético primario de proveer una unidad de prestación j UP_j realmente garantizada o una unidad de prestación j definida para la locación específica $UP_{j,obj}$. Un caso interesante de analizar es considerar el costo energético primario para pasar de la unidad de prestación realmente garantizada a la definida para la locación específica, es decir,

$$\Delta UP_j = UP_{j,obj} - UP_j \quad (3.62)$$

En ese caso la expresión (3.60) brindaría el costo de energía primaria para pasar de un estado de prestación a otro utilizando el sistema energético, el parque de equipamiento y los contextos actuales.

Variación del Costo Energético Primario de la Unidad de Prestación debido a Intervenciones de Eficiencia Energética en Usos Finales

En los puntos anteriores no se consideraron reasignaciones de recursos económicos de los consumidores finales a otros sectores, simplemente el resultado económico de las intervenciones era un mayor o menor

consumo del producto i del modelo IO correspondiente con la energía secundaria k (o con varias energías secundarias en algunos casos). Se considera ahora el caso de realizar intervenciones de eficiencia energética en los usos finales, que tengan por objeto reducir la cantidad de energía secundaria demandada para garantizar la actual unidad de prestación, la unidad de prestación definida o, en caso de que la prestación sea inferior a la definida, lograr aumentar la cantidad de servicio energético que se provee. Las intervenciones consisten en modificar los rendimientos del equipamiento y del contexto, que tal como fuera mencionado en el Capítulo 1, constituyen un gran potencial para hacer más sustentable la cadena energética global. El cálculo siguiente permite evaluar los efectos finales en términos de recursos evitados y así comparar intervenciones de política pública en la demanda final respecto de intervenciones en cualquiera de los sectores de oferta. El análisis es similar al realizado en el punto anterior, pero a diferencia del mismo, aquí además de considerarse variaciones en la demanda final de energéticos (3.57), se deberán contabilizar las *variaciones en la demanda de bienes y servicios necesarios para dichas intervenciones* (e.g. aumento en la demanda de aislantes, artefactos, servicios de instalación y construcción, servicios financieros, etc.).

Dada una intervención de eficiencia energética en usos finales, cuyo impacto en términos de energía primaria pretenden ser evaluados, se deben determinar las siguientes características:

- Bienes involucrados en la intervención:* deben identificarse los productos del modelo IO propios de la intervención tecnológica cuya demanda aumentaría, siendo también necesario definir los flujos monetarios que el sector de uso final destinaría hacia dichos productos.
- Servicios involucrados en la intervención:* deben identificarse los productos del modelo IO que representan servicios conexos y accesorios a la intervención analizada (e.g. mano de obra de instalación, reparaciones, construcción, servicios financieros), además de definirse también los flujos monetarios que el sector de uso final destinaría a dichos productos.
- Vida útil o período de amortización de la intervención:* debe definirse el número de años en que se supone persistirán los efectos energéticos debidos a la intervención, de manera de poder *prorratar* o *distribuir* los flujos monetarios asignados a la intervención calculados en los puntos (a) y (b).
- Nuevo rendimiento de contexto:* debe determinarse el nuevo rendimiento de contexto luego de las mejoras ocasionadas por la intervención (si es que existieron variaciones en el mismo), para poder estimar el consumo o requerimiento (según se trate) de energía útil luego de la intervención.
- Nuevo rendimiento de equipamiento:* debe determinarse el nuevo rendimiento de los equipos luego de las mejoras ocasionadas por la intervención (si es que existieron variaciones en el mismo) para en base al punto (d) calcular las variaciones en el consumo o requerimiento (según se trate) de energía secundaria.

La expresión (3.63) muestra la variación que se observa en la energía secundaria k que se utiliza para satisfacer totalmente o parcialmente la unidad de prestación j luego de realizada la intervención,

$$\Delta \tilde{E}_{s,k,j} = \left(\frac{\lambda'_{k,j}}{\eta'_{e,k,j} \eta'_{c,j}} - \frac{\lambda_{k,j}}{\eta_{e,k,j} \eta_{c,j}} \right) UP_j \quad (3.63)$$

donde:

UP_j representa la unidad de prestación j suministrada;

$\lambda_{k,j}$ representa la parte de la unidad de prestación j que se provee con el energético k antes de la intervención, considerada la participación en energía útil;

$\lambda'_{k,j}$ representa la parte de la unidad de prestación j que se provee con el energético k luego de la intervención, considerada la participación en energía útil;

$\eta_{e,k,j}$ es el rendimiento del equipamiento o el conjunto de equipamientos que proporcionan la energía útil para satisfacer la unidad de prestación j utilizando el energético k antes de la intervención;

$\eta'_{e,k,j}$ es el rendimiento del equipamiento o el conjunto de equipamientos que proporcionan la energía útil para satisfacer la unidad de prestación j utilizando el energético k luego de la intervención;

$\eta_{c,j}$ es el rendimiento de contexto para la unidad de prestación j antes de la intervención;

$\eta'_{c,j}$ es el rendimiento de contexto para la prestación j luego de la intervención.

Como $\lambda_{k,j}$ y $\lambda'_{k,j}$ se refieren a la participación del k -ésimo vector energético en el suministro de la prestación j , deben verificarse para ambos parámetros las relaciones (3.64) y (3.65),

$$\sum_{k=i}^L \lambda_{k,j} = 1 \quad (3.64)$$

$$\sum_{k=i}^L \lambda'_{k,j} = 1 \quad (3.65)$$

donde L representa el número de vectores energéticos distintos que se utilizan para una misma unidad de prestación j .

Al igual que en el punto anterior, la variación total de energía secundaria $\Delta E_{s,j}$ se obtiene según la expresión (3.55) y lo mismo sucede con la variación relativa del consumo de la energía secundaria $\Delta p_{k,j}$, mediante la expresión (3.56).

Para determinar el vector variación de demanda final Δe del modelo IO, a diferencia del caso anterior se deben contemplar las variaciones en la demanda de productos involucrados en las intervenciones además de las variaciones en la demanda final de energías secundarias. Si el producto i se corresponde con la energía secundaria k , entonces $\Delta e_{i,j}$ se obtiene según la expresión (3.66) al igual que en el caso anterior; si se corresponde con un bien o servicio involucrado en la intervención se calcula según (3.67); y en cualquier otro caso se considera $\Delta e_{i,j} = 0$.

$$\Delta e_{i,j} = +\Delta p_{k,j} e_{i,res} \quad (3.66)$$

$$\Delta e_{i,j} = N\zeta_{i,j} \quad (3.67)$$

En la expresión (3.67) $\zeta_{i,j}$ representa la cantidad de unidades monetarias en que varía el consumo final del producto i para la intervención sobre una unidad de prestación j (i.e. el costo de la intervención por cada unidad de prestación), mientras que N representa el número de unidades de prestación que se proveen en la población de estudio (que coincide con el número de habitantes, pues la unidad de prestación se definió per cápita).

Aplicando nuevamente las relaciones (3.59) y (3.60) se obtiene la variación de energía primaria producto de la intervención de eficiencia energética en usos finales $\Delta C_{p,UP_j}$, y el nuevo costo energético de proveer la unidad de prestación j luego de las mejoras considerando los efectos directos e indirectos C'_{p,UP_j} se obtiene según la expresión (3.68),

$$C'_{p,UP_j} = C_{p,UP_j} + \Delta C_{p,UP_j} \quad (3.68)$$

donde C_{p,UP_j} es el costo energético primario de la suministrar la unidad de prestación j antes de la intervención obtenido según la expresión (3.61).

- *Determinación de los costos de las intervenciones*

Se brindan a continuación lineamientos básicos para el cálculo de las unidades monetarias en que varía la demanda final de cada producto del modelo IO involucrado en la intervención $\zeta_{i,j}$ (i.e. el cálculo del costo económico, y su distribución en bienes y servicios, para realizar una intervención determinada). Lo siguiente constituye solamente una guía, pues el cálculo que debe realizarse es un sencillo cómputo de costos, tarea habitual de posibles organismos implementadores de la presente metodología.

Para la determinación del costo de las intervenciones, se debe primero caracterizar las mismas en los aspectos que se especifican a continuación:

- *Horizonte de inversión:* a cada intervención que se realice, que implique cambios estructurales en cualquiera de los dos rendimientos (i.e. rendimientos de contexto o de equipamiento) hay que definirle un horizonte de inversión, que podrá ser la vida útil, plazo de amortización contable, o algún otro criterio que se decida. Considerado el horizonte de la inversión Y , entonces los costos totales deben distribuir a lo largo de los Y años según la hipótesis de financiamiento que se considere para la realización.
- *Costo total de la intervención:* para cada intervención debe calcularse su costo total, no sólo en términos de los bienes necesarios (e.g. aislantes, equipos, etc.) sino también deben considerarse los servicios de instalación, refacción, modificación, y los costos financieros derivados de créditos y préstamos necesarios para llevar a cabo las mejoras.
- *Participación de la intervención en la unidad de prestación j :* en caso de que una misma intervención genere alteraciones en más de una unidad de prestación (e.g. aislación térmica de cubiertas, que

genera mejoras en la prestación tanto de calefacción como de refrigeración) debe distribuirse con algún criterio la inversión total en las distintas unidades de prestación. Incluso puede suceder que la misma intervención ocasione mejoras en otras prestaciones (e.g. la aislación térmica de muros y aberturas en muchos casos conlleva aislación acústica), en ese caso, sólo una parte del costo de la intervención debe computarse.

Luego de considerar estos lineamientos preliminares, se debe proceder con la determinación del costo de bienes de capital y el costo de la mano de obra necesaria para la implementación. Así el costo total de una cierta intervención será la suma de ambos costos, según la expresión (3.69),

$$I = I_K + I_W \quad (3.69)$$

Luego se asumirá que si bien la intervención se realiza en un momento específico, sus costos se distribuyen a lo largo de la vida útil del mismo, pudiendo escribirse el costo total de la intervención según la expresión (3.70),

$$I = \sum_{j=1}^Y I_{K,j} + I_{W,j} \quad (3.70)$$

donde:

$I_{K,j}$ representa el valor de *cuota capital (erogación anual)* asociado a los bienes de capital de la intervención;

$I_{W,j}$ representa el valor de *cuota capital (erogación anual)* asociado a los servicios de mano de obra necesarios de la intervención;

Y representa el número de años en que la intervención *tiene efecto energético*, (i.e. cuánto tiempo se garantiza un menor consumo de energía por la intervención realizada) y su criterio de elección estará relacionado con la vida útil de las tecnologías y materiales implicados.

Es adecuado considerar que las intervenciones serán realizadas a partir de un financiamiento, en ese caso, el costo financiero asociado se obtiene según la relación (3.71),

$$CF = \sum_{k=0}^{Y-1} I \left(1 - \frac{k}{Y}\right) r \quad (3.71)$$

donde r es la tasa de descuento de referencia adoptada.

Se aclara que dado el carácter *estacionario* que tiene el análisis IO se puede prorratar ese costo financiero de forma lineal durante toda la vida útil de la intervención. De todos modos distintas variantes para el cálculo

del costo financiero son válidas, bajo la precaución de considerar luego importes totales fijos durante los N años.

Es importante la correcta elección de la tasa de descuento de referencia por parte del organismo que implemente la metodología, pues esta debe ser representativa del costo de oportunidad existente y eso depende de qué decisiones de política pública se tomen a partir de los resultados del presente trabajo. Para este punto también se recomienda seguir procedimientos de adopción de hipótesis financieras propias del organismo, a los efectos de obtener resultados comparables (e.g. comparación de políticas de eficiencia energética con aumento de oferta energética mediante construcción de centrales eléctricas).

Luego, los flujos monetarios anuales para cada uno de los sectores estarán dados por las expresiones (3.72), (3.73) y (3.74).

$$f_K = \frac{I_K}{Y} \quad (3.72)$$

$$f_W = \frac{I_W}{Y} \quad (3.73)$$

$$f_F = \frac{CF}{Y} \quad (3.74)$$

Luego, los valores de $\varsigma_{i,j}$ deberán compilarse a partir de los resultados de las fórmulas expresiones (3.72), (3.73) y (3.74) pues cada flujo monetario anual, sea de bienes, servicios y costos financieros, estará distribuido en productos del modelo IO.

La posibilidad de comparar los resultados de esta metodología con otros estudios energéticos es probablemente una de las mayores ventajas que presenta. Así como se mencionó la uniformidad de criterio en la elección de la tasa de descuento del capital, también puede resultar de mucha utilidad que los costos se determinen según indicadores de costos específicos nombrados, referenciados y de público conocimiento (e.g. índice de la construcción, índice de costos de materiales, índices de costos de mano de obra).

4. Caso de Aplicación

Se aplicó la metodología presentada en el Capítulo 3 al estudio de los consumos de calefacción y refrigeración para cinco ciudades de la República Argentina: Rosario, Mendoza, San Carlos de Bariloche, San Miguel de Tucumán y Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Para cada una de estas ciudades, se definieron las unidades de prestación de calefacción y refrigeración, se extendió el balance energético y se presentó el acoplamiento entre calidad y exigencia. La elección de las mismas se fundamenta en las asimetrías y diferencias en los contextos climáticos, socioeconómicos y habitacionales de las mismas, lo que permite un análisis comparativo de los resultados obtenidos a efectos de una mejor ilustración de la metodología. Luego mediante el análisis IO, a escala nacional (i.e. sin poder discriminar entre distintas localidades), se calculó el costo de energía primaria para las unidades de prestación de calefacción y refrigeración considerando una *ciudad promedio*, antes y después de intervenciones de eficiencia energética en usos finales, de forma de ver el impacto de las mejoras propuestas.

La definición del caso de estudio, en cuanto a sus límites y alcances, se realizó considerando los siguientes criterios: (1) posibilidad de poner en evidencia los aspectos relevantes y las ventajas de aplicar la metodología; (2) disponibilidad de datos; (3) posibilidad de extraer conclusiones sobre los resultados obtenidos; y finalmente (4) que se constituya el caso de aplicación como modelo escalable a otras localidades, regiones, países y fundamentalmente que invite a continuar y ampliar sus alcances a otros usos y otros sectores de consumo final de energía.

En una primera parte del Capítulo se enumeran los datos de referencia y los supuestos preliminares adoptados. Luego, se definen las unidades de prestación de calefacción y refrigeración para cada una de las localidades, se calculan los factores de cobertura, y el acoplamiento exigencia calidad en cada caso. Finalmente, se determina el costo de energía primaria de las unidades de prestación en la situación actual, caso considerado base, y para tres escenarios de mejora de la eficiencia energética en el uso final: (a) mejora en la eficiencia de los artefactos de calefacción y refrigeración (i.e. incremento del rendimiento de equipamiento), (b) mejoras en la aislación de viviendas (i.e. incremento en el rendimiento de contexto), (c) la combinación de los escenarios (a) y (b).

4.1. Datos de Referencia y Supuestos Preliminares

Dada la posibilidad de aplicación parcial de la metodología propuesta, se presentan los datos de referencia y supuestos preliminares de forma desagregada para cada parte de la aplicación, sólo a efectos de un mejor orden. Muchos datos y supuestos adoptados para una parte se necesitan también luego, por lo que al no aclararse ningún cambio en los mismos se asume que los valores de referencia previamente asumidos se conservan.

4.1.1. Definición de Unidades de Prestación y Extensión del Balance Energético

Se definieron las unidades de prestación de calefacción y refrigeración para Rosario, Mendoza, San Carlos de Bariloche, San Miguel de Tucumán y Ciudad Autónoma de Buenos Aires. En el caso de San Carlos de Bariloche, al no tener requerimiento de refrigeración no se calculó su unidad de prestación de refrigeración. Rosario se adoptó como localidad de referencia para la definición de las unidades de prestación, a las cuales se refirieron las de las restantes ciudades en términos de unidades de prestación equivalentes.

- *Cálculo de las Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración*

La condición de confort fue adoptada para todas las localidades en el mismo nivel, es decir se entiende que no existen limitaciones coyunturales para garantizar el confort. Esta decisión claramente no refleja la realidad, pues entre las localidades analizadas existen asimetrías económicas, pero se realizó en aras de simplicidad y una mejor visualización y comprensión de las ventajas y alcances de la metodología. En caso de ahondar en detalles y establecer condiciones de confort particulares para cada localidad, es necesario seleccionar un conjunto de variables económicas (e.g. necesidades básicas insatisfechas, índices de pobreza, nivel de ingreso, etc.), y establecer una correlación entre ellas y los días de confort garantizados $D_{conf,c}$ y $D_{conf,r}$. Se adoptó entonces, que las temperaturas de confort $\theta_{conf,c}$ y $\theta_{conf,r}$ se garantizan durante los períodos de calefacción y refrigeración definidos por el clima de cada localidad, las 24 horas del día.

La condición socioeconómica fue determinada a partir de variables de datos publicados de manera oficial por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) a partir del censo del año 2010, adoptando en 20 m^2 el área media de un ambiente que compone la vivienda típica, además de considerar que el área climatizada de las viviendas es del 70% (Instituto de Estadísticas y Censos de Argentina, 2010). La información estadística del área de las viviendas no está dada en metros sino en cantidad de ambientes, es por ello que fue necesario definir un valor de área de ambientes. De todos modos, como el objetivo último de la metodología es la posibilidad de comparar, divergencias entre el valor adoptado y valores reales no introducen problemas en la aplicación dado el carácter relativo y no absolutos de los principales resultados.

Para la determinación de la condición climática de cada localidad, se utilizó la información del Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas a través del Aplicativo Nacional de Etiquetado de Viviendas (SGE, 2018). El mismo, realiza el balance térmico de cualquier prototipo que se ingrese aplicando el procedimiento de cálculo establecido a nivel nacional (IRAM, 2017), y la información climática se basa en datos recolectados por el Servicio Meteorológico Nacional. El procedimiento de cálculo es estacionario con corrección dinámica de base mensual, por lo que cada localidad está caracterizada por valores medios mensuales de variables climáticas. Las variables climáticas de las localidades analizadas se muestran de forma resumida en la Tabla 9, y se presentan con mayor detalle en el Anexo (Tabla A.1, Tabla A.2, Tabla A.3, Tabla A.4, Tabla A.5). Las temperaturas de confort se consideraron 20°C y 26°C para calefacción y refrigeración respectivamente (IRAM, 2017). La realización del cálculo mediante el Aplicativo Nacional de Etiquetado de Viviendas se realizó a los efectos de obtener resultados que puedan ser compatibles con los procesos de evaluación de eficiencia

energética de viviendas que actualmente se están desarrollando en el país, tanto para la comparación de los mismos, como para futuras implementaciones de la presente metodología. El prototipo de vivienda de prueba fue establecido como una tipología abstracta (i.e. definida a través de sus parámetros específicos) con valores considerados habituales de la praxis constructiva más común en el país, según la Tabla 10. Como el aplicativo mencionado no admite el ingreso de un ente abstracto como prototipo, sino que debe necesariamente considerarse un prototipo real, entonces se adoptó un prototipo de $60m^2$, con una planta cuadrada de $8m \times 8m$, y altura de entepiso de $2,5m$.

Tabla 9: Resumen de las principales variables climáticas para las localidades estudiadas.

Mes	Rosario				Mendoza				Bariloche				Tucumán				Buenos Aires			
	D_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{hor,i}$		D_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{hor,i}$		D_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{hor,i}$		D_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{hor,i}$		D_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{hor,i}$	
		$^{\circ}C$	W/m^2			$^{\circ}C$	W/m^2			$^{\circ}C$	W/m^2			$^{\circ}C$	W/m^2			$^{\circ}C$	W/m^2	
January	R	31	25	289	R	31	26	250	-	0	14,5	298	R	31	24,6	243	R	31	24,7	274
February	R	28	23,6	252	R	28	24,1	241	-	0	14,9	268	R	28	23,6	224	R	28	23,8	238
March	R	15	21,6	208	R	15	21,5	226	C	31	12,2	199	R	31	22,5	215	R	15	22	193
April	-	0	17,5	158	-	0	16,7	182	C	30	8,6	134	-	0	19	179	-	0	18,7	140
May	C	15	13,8	123	C	15	12,5	147	C	31	5,5	84	-	0	18,6	146	C	15	15,3	105
June	C	30	11	99	C	30	9,2	124	C	30	3,6	58	C	30	13,2	132	C	30	11,9	87
July	C	31	10	120	C	31	8,6	142	C	31	2,7	74	C	31	12,2	155	C	31	11,3	93
August	C	31	12	150	C	31	11,4	178	C	31	2,8	103	C	31	15,2	191	C	31	12,3	139
September	C	15	15	187	C	15	14,7	210	C	30	5,3	167	-	0	18,6	221	C	15	15,2	166
October	-	0	18,5	233	-	0	18,9	252	C	31	7,4	227	-	0	21,7	238	-	0	17,7	210
November	R	15	21,5	285	R	15	20,6	258	C	30	9,9	280	R	30	23,2	235	R	15	21,3	258
December	R	31	23,6	293	R	31	23,7	265	-	0	12,4	297	R	31	26	239	R	31	23,8	276

Tabla 10: Parámetros específicos de definición del prototipo de vivienda de prueba.

Símbolo	Unidad	Valor
S/A	m^2/m^2	3,25
b	-	0,69
U	W/m^2K	2,12
U_w	W/m^2K	4,90
e	-	0,04
α	-	0,69
τ	-	0,80
$H_{inf,c}$	W/m^2K	0,30
$H_{inf,r}$	W/m^2K	1,80
τ_c	h	10,07
τ_r	h	7,72

- *Análisis de sensibilidad de la relación entre unidades de prestación respecto de la definición del prototipo de vivienda de prueba*

En análisis de sensibilidad se realizó con los fines de evaluar la variación de la relación entre una unidad de prestación y la de referencia, respecto de variaciones en los parámetros de definición del prototipo de vivienda de prueba, según las expresiones (4.1) y (4.2),

$$\left| \frac{\frac{\partial(P_{c,obj}/P_{c,obj,0})}{\partial \xi} \Delta \xi}{(P_{c,obj}/P_{c,obj,0})} \right| \quad (4.1)$$

$$\left| \frac{\frac{\partial(P_{r,obj}/P_{r,obj,0})}{\partial \xi} \Delta \xi}{(P_{r,obj}/P_{r,obj,0})} \right| \quad (4.2)$$

donde ξ representa cada una de las variables modificadas $\pm 25\%$ respecto del valor base. Las variables consideradas para el análisis fueron: el área de la superficie de la vivienda A , el área de envolvente transparente $e.S$, la transmitancia de la envolvente opaca U , la transmitancia de la envolvente transparente U_w , el coeficiente de absorción de las superficies opacas α y el factor de ajuste de adyacencias b .

- *Extensión del balance energético*

Para la realización del balance energético extendido se utilizaron datos del Balance Energético Nacional (SGE, 2016) y del Balance de la Agencia Internacional de la Energía para la República Argentina (International Energy Agency, 2016) (Tabla A.6 del Anexo), ambos del año 2016. Si bien en la Argentina actualmente se está llevando a cabo un Balance de Energía Útil, los resultados del mismo aún no han sido publicados, por lo que ante la ausencia de datos se construyó un modelo de balance a partir de la poca información disponible. El mismo fue elaborado a partir de patrones de uso de energía obtenidos por Gastiarena y Gil en base a encuestas (Gastiarena y Gil, 2017), y expandiendo para las distintas provincias con datos del Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) y de la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (CAMMESA) también con datos del año 2016. Como los datos para la expansión son de base provincial, fue necesario considerar estos valores también para las localidades específicas, pero como se trata de ciudades muy pobladas y con una gran participación en el consumo provincial, el error introducido por esta necesaria simplificación se considera menor y tampoco dificulta el objeto de ejemplificar la metodología. Asimismo, como los consumos de gas envasado en las localidades estudiadas no son muy significativos, se consideró sumar los mismos al consumo de gas distribuido por redes. El factor de conversión a energía primaria f_{pr} se adoptó en 3,3 para energía eléctrica y 1,25 para gas natural (IRAM, 2017; SGE, 2016). Para la adopción de los factores de conversión, bien podrían haberse utilizado los valores propuestos por Sensini et al. que contemplan un pormenorizado análisis de toda la cadena energética (Sensini et al., 2018), pero se optó por

los que actualmente figuran en la normativa vigente en aras de lograr compatibilidad con otros estudios actuales.

La determinación de los rendimientos de equipamiento y contexto promedios para las cinco localidades fue realizada a partir de las bases de datos de relevamientos en el marco de las distintas pruebas piloto de etiquetado de viviendas llevadas a cabo en el país desde el año 2017 y hasta la actualidad. Los datos de los relevamientos se encuentran disponibles en la plataforma del Aplicativo Nacional de Etiquetado de Viviendas y son compartidos de forma agregada bajo requerimiento (SGE, 2018). En la Tabla A.6 del Anexo se presentan las características térmicas específicas de las viviendas promedio para cada una de las localidades estudiadas. Los rendimientos de equipamientos se obtuvieron de forma directa, mientras que para determinar los rendimientos de contexto se aplicaron las expresiones (3.30) y (3.31) a las viviendas de cada localidad y luego se hizo un promedio. Si bien los datos que emergen de relevamientos realizados en las pruebas piloto no constituyen información de validez estadística, a los efectos de ejemplificar la metodología se consideran adecuados. Países con más años de incursión en políticas de calificación y etiquetado de edificios ya han logrado sistematizar la información dentro de los sistemas estadísticos nacionales y regionales. En la Tabla 11 se resumen los rendimientos de contexto y equipamientos para calefacción y refrigeración, y en el caso de calefacción también se indica la participación de cada energía secundaria.

Tabla 11: Rendimientos de contexto, rendimiento de equipamiento y participación de energías secundarias en el consumo (sólo en el caso de calefacción) para las localidades analizadas.

	Rosario	Mendoza	Bariloche	Tucumán	Buenos Aires
Calefacción					
Rendimiento de contexto ($\eta_{c,c}$)	1,13	1,02	1,38	1,05	1,18
Rendimiento de equipos a gas ($\eta_{e,GN,c}$)	0,73	0,69	0,66	0,73	0,69
Rendimiento de equipos eléctricos (COP - rend.) ($\eta_{e,EE,c}$)	2,47	2,26	2,00	2,30	1,20
Rendimiento promedio ($\eta_{e,c}$)	0,78	0,71	0,67	0,85	0,70
Participación de gas natural en el consumo	0,97	0,98	0,99	0,92	0,98
Participación de electricidad en el consumo	0,03	0,02	0,01	0,08	0,02
Refrigeración					
Rendimiento de contexto ($\eta_{c,r}$)	2,07	1,70	-	2,32	1,82
Rendimiento de equipamiento (COP) ($\eta_{e,r}$)	2,99	2,82	-	3,25	2,85

4.1.2. Nivel de Acoplamiento entre Calidad y Exigencia

Para la aplicación de la segunda parte de la metodología, se adoptaron también los mismos datos climáticos del Aplicativo Nacional de Etiquetado de Viviendas, y los valores de contexto promedios surgidos de los relevamientos realizados en la prueba piloto. Se agregan a los datos presentados en el apartado anterior las temperaturas máximas y mínimas de diseño, que no se refieren a temperaturas máximas o mínimas absolutas, sino que hacen referencia a los valores que se adoptan como casos más extremos para el diseño de instalaciones, según se observa en la Tabla 12 (SGE, 2018). Para esta se consideró la temperatura de

erogación de los equipos de calefacción en 75°C y que la participación entre gas y electricidad para el uso de calefacción es la del balance de energía útil. Para el caso de la refrigeración, se consideró que la temperatura del evaporador (i.e. lo más parecido idealmente al foco frío) es de 10°C.

Tabla 12: Temperaturas máximas y mínimas de diseño para las localidades analizadas.

Localidad	$\theta_{\min}$ °C	$\theta_{\max}$ °C
Rosario	2	33
Mendoza	-1	34
Bariloche	-3	22
Tucumán	5	33
Buenos Aires	0	29

4.1.3. Evaluación del Costo Energético Primario

Para la evaluación del costo energético primario se construyó un modelo IO, para aplicar luego a los 4 escenarios de intervenciones en usos finales.

- *Construcción del modelo IO*

Para la construcción del modelo IO, se adoptó el enfoque producto-industria con 196 productos y 125 industrias bajo la hipótesis de *Tecnología basada en la Producción (Industry based technology)*. Los cuadros de oferta y utilización para determinar las matrices del modelo fueron obtenidos de la base de datos Eora SUTs 2015 Basic Prices (Lenzen et al., 2013, 2012). En el Anexo (Tabla A.7 y Tabla A.8) se observan las 125 industrias y los 196 productos de la economía. Las Tablas Eora consisten en un modelo Input-Output multiregional (*MRIO - Multiregional Input-Output Model – por sus siglas en inglés*) y proveen una serie temporal de alta definición de cuadros de oferta y utilización y matrices satélites para 190 países. Las matrices están confeccionadas con precios de base o precios de compra, habiéndose optado por utilizar precios de base. Las matrices satélites proporcionadas por Eora no fueron utilizadas, sólo se utilizaron las tablas SUTs con el objeto de entender las interacciones *energéticas* a partir de una correlación con las interacciones *monetarias* entre productos e industrias. La última matriz insumo producto elaborada en la República Argentina data del año 1997, siendo esta estructura de relaciones la utilizada por Eora para llegar a los datos del año 2015 mediante ajustes en base a variables macroeconómicas (Ministerio de Economía, 1997). La estructura económica argentina, y especialmente el sector energético en el año 1997 eran muy distinta respecto del año 2015, por lo que sería sensato suponer que si bien en términos globales los datos proporcionados por Eora son consistentes a nivel macroeconómico, es probable que existan interrelaciones en los sectores que *no reflejen de forma real* la economía actual. Aún así, a los efectos de ejemplificar los alcances de la metodología los datos son suficientes. La inexistencia de una Matriz Insumo Producto actualizada para el país es una carencia muy significativa, y de no abordarse esta falta de datos en el mediano

plazo, los resultados de análisis de impacto de cualquier tipo presentarán grandes niveles de incertidumbre que pongan en duda las conclusiones por ellos obtenidas.

El vector de energía extraída **R** se construyó con datos del Balance Energético de la IEA para la República Argentina (International Energy Agency, 2016), y la asignación a las diferentes industrias del modelo IO fueron realizadas según la Tabla 13 (Owen et al., 2017). Se asignaron valores de oferta total de energía primaria (*TPES*) a industrias extractivas para recursos fósiles y al sector productor de electricidad en caso de recursos renovables. Se asumió que la energía importada como localmente producida (i.e. el costo en términos de recursos primarios es el mismo en cualquier lugar del mundo). Los productos *Transmission and distribution service (158)* y *Gas distribution services through mains (159)* se identificaron como *commodities* que representan electricidad y gas por redes respectivamente (Tabla A.7 y Tabla A.8 del Anexo).

Tabla 13: Asignación de fuentes de energía primaria para la construcción del vector energía extraída **R**.

Industria	Valor ktep	Energía primaria	Valor ktep
Extraction of petroleum, gas, coal and uranium	78799	Coal	823
		Crude oil	28068
		Oil products	3097
		Natural gas	44652
		Nuclear	2159
Oils and oilseeds products	3379	Biofuels and waste	3379
Electricity	4075	Hydro	3207
		Geothermal, solar, etc.	49
		Electricity	819

Como el modelo IO es de escala y resolución nacional, fue necesario establecer valores promedios para parámetros de uso final de la energía (e.g. consumo de energía secundaria, consumo de energía útil, factor de cobertura, rendimiento de contexto y de equipamiento, unidad de prestación definida) de manera de poder acoplar el modelo IO con datos de consumo final de energía. Para ello, la ciudad de Rosario fue considerada como la *ciudad promedio* y se adoptaron sus parámetros de consumo como medias nacionales. Esta etapa de la aplicación podría haberse realizado utilizando efectivamente valores promedios, pero como la información de base no es de mucha calidad, como se anticipó en el párrafo anterior, no se consideró oportuno avanzar en ese sentido. Nuevamente se destaca el hecho de que esta aplicación se realizó a fines de ejemplificar y evidenciar las ventajas de la metodología propuesta, pero bajo ningún punto de vista intenta ser un estudio representativo de la realidad completa de un país. Una aplicación real requeriría la utilización de técnicas estadísticas con gran cantidad de datos, tarea que no está en los objetivos del presente trabajo y que debe realizarse por organismos con infraestructura, pericia y experiencia en manejo de datos estadísticos por parte de organismos nacionales.

- *Definición de escenarios de mejora*

El costo energético primario de las unidades de prestación de calefacción y refrigeración fue calculado para cuatro escenarios de mejora de la eficiencia energética en el uso final. El *Escenario 0* constituye el caso base, en el cual se adoptan eficiencias de equipamiento y de contexto actuales (i.e. línea de base sin mejoras). El *Escenario 1* consiste en mejorar la eficiencia de los equipos de calefacción y refrigeración además de una sustitución de energías secundarias ($\lambda'_{k,j}$; $\eta'_{e,k,j}$), reemplazando artefactos a gas por bombas de calor de alto coeficiente de prestación (*COP - coefficient of performance – por sus siglas en inglés*) e incrementando el COP de equipos de refrigeración. El *Escenario 2* propone mejorar la eficiencia de contexto ($\eta'_{c,j}$) mediante aislación de cubierta con fieltro de lana de vidrio de 5cm de espesor y aislación interna de paredes con placa de roca de yeso de 1,1cm de espesor; mientras que el *Escenario 3* considera los Escenarios 1 y 2 juntos, es decir mejoras en los sistemas activos y en los sistemas pasivos ($\lambda'_{k,j}$; $\eta'_{e,k,j}$; $\eta'_{c,j}$). El *Escenario 1* genera cambios en el consumo de energía secundaria sin alterar el consumo de energía útil; el *Escenario 2* genera cambios en el consumo de energía útil, pero mantiene la relación entre energía útil y secundaria; mientras que el *Escenario 3* reduce el consumo de energía útil, además de también incrementar la eficiencia de conversión de energía secundaria a energía útil. En la Tabla A.7 del Anexo se presentan las características térmicas específicas de la vivienda considerada promedio (i.e. Rosario) para los distintos escenarios de mejora, observándose el cambio en el valor de transmitancia térmica en los Escenarios 2 y 3 respecto de los Escenarios 1 y 2.

El costo de los equipos de calefacción y refrigeración se distribuyó en 10 años, y no se incluyó en el cálculo un valor de recupero de los mismos finalizado el horizonte de vida de los mismos, ni tampoco un eventual valor de reventa de los equipos que fueron sustituidos. En el caso de las intervenciones en el sistema pasivo (i.e. la aislación de paredes y cubierta) se distribuyó su costo en 30 años, sin considerar tampoco valor de recupero alguno. Además del costo de los materiales, en ambas intervenciones se incluyeron costos de instalación y costos financieros, también distribuidos en 10 ó 30 años respectivamente. Intervenciones con efecto simultáneo en las dos unidades de prestación (i.e. aislación en paredes y cubiertas) fueron contabilizadas en partes iguales para los dos usos, es decir 50% de afectación al cálculo del costo energético primario de cada prestación. En la definición del alcance temporal del análisis, no se contabilizó la energía embebida en bienes preexistentes a las intervenciones (e.g. la construcción de la vivienda) adoptando como criterio que lo ya construido no forma parte del análisis. La Tabla 14 muestra la distribución de costos de cada intervención para los distintos escenarios, mientras que la Tabla 15 exhibe las variaciones de los flujos monetarios en el modelo IO desde el consumo final hacia los diferentes productos involucrados en las intervenciones (según Tabla A.9 y Tabla A.10 del Anexo).

Tabla 14: Costo total de las intervenciones, productos involucrados y costo anual para los diferentes escenarios, en dólares estadounidenses por persona por año.

Escenario 1			
	Índice	USD/p	USD/p . a
Costo de materiales (equipos)	122	500	50
Costo de mano de obra	161	100	10
Costo financiero	179	90	9
Escenario 2			
	Índice	USD/p	USD/p . a
Costo de materiales (aislantes)	87	480	16
Costo de mano de obra	161	480	16
Costo financier	179	96	3,2
Escenario 3			
	Índice	USD/p	USD/p . a
Costo de materiales (equipos)	122	-	50
Costo de materiales (aislantes)	87	-	16
Costo de mano de obra	161	-	26
Costo financiero	179	-	12,2

Tabla 15: Variación del vector de demanda final (Δe_k) para los distintos escenarios, en millones de dólares estadounidenses por año.

Commodities	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración	Calefacción	Refrigeración
Transmission and distribution services (158)	981	-103	-95	-337	218	-391
Gas distribution services through mains (159)	-1135	-	-772	-	-1135	-
Household appliances and parts (122)	1100	1100	-	-	1100	1100
Other plastic products (87)	-	-	352	352	352	352
Financial intermediation (161)	220	220	352	352	572	572
Maintenance and repair services (179)	198	198	70	70	268	268

4.2. Resultados y Discusión

Se presentan a continuación los resultados parciales y finales de aplicar la metodología propuesta y una breve discusión sobre cada uno de ellos, con la intención de poner en relieve las ventajas del método y resaltar la información novedosa que la metodología brinda a efectos del diseño de políticas públicas de eficiencia energética. Al igual que lo realizado en la Sección anterior, dada la aplicación parcial y segmentada de la metodología, los resultados se muestran y estructuran por etapas para un mejor orden y entendimiento.

4.2.1. Definición de Unidades de Prestación y Extensión del Balance Energético

En este apartado se brindan en primer lugar los resultados intermedios necesarios para definir las unidades de prestación, luego se presenta un análisis de sensibilidad y finalmente se elabora el Balance Energético Extendido para el uso de calefacción y refrigeración para las ciudades analizadas.

- *Cálculo de las Unidades de Prestación de Calefacción y Refrigeración*

Las condiciones de confort c y las condiciones socioeconómicas se para la definición de las unidades de prestación de calefacción y refrigeración, junto con las variables que las determinan, son presentadas en la Tabla 16 y en la Tabla 17. Las condiciones climáticas para calefacción zc_c y refrigeración zc_r se exhiben en la Tabla 18. En todos los casos se muestra también la relación con la condición para la ciudad de referencia.

Tabla 16: Condición de confort y variables que la determinan para las localidades analizadas.

Localidad	θ_{conf} °C	D_{conf} días	c -	c/c_0 -
Rosario	20	122	1,00	1,00
Mendoza	20	122	1,00	1,00
Bariloche	20	275	1,00	1,00
Tucumán	20	92	1,00	1,00
Buenos Aires	20	122	1,00	1,00

Tabla 17: Condición socioeconómica y variables que la determinan para las localidades analizadas.

Localidad	A_{inm} m ² /viv	O p/viv	a_{clim} -	se m ² /p	se/se_0 -
Rosario	66,95	3,1	0,70	15,12	1,00
Mendoza	68,26	3,5	0,70	13,65	0,90
Bariloche	63,49	3,1	0,70	14,34	0,95
Tucumán	66,98	3,9	0,70	12,02	0,80
Buenos Aires	59,61	2,5	0,70	16,70	1,10

Tabla 18: Condiciones climáticas de calefacción y refrigeración para las localidades analizadas.

Localidad	zC_c kWh/m ²	zC_c/zC_{c,0} -	zC_r kWh/m ²	zC_r/zC_{r,0} -
Rosario	102	1,00	54	1,00
Mendoza	124	1,26	51	1,26
Bariloche	426	4,18	-	-
Tucumán	61	0,60	58	0,60
Buenos Aires	98	0,96	51	0,96

Las unidades de prestación para cada localidad, junto a las condiciones que las definen, y las relaciones con la referencia se muestran en la Tabla 19 en el caso de calefacción y en la Tabla 20 en el caso de refrigeración.

Tabla 19: Unidad de prestación de calefacción y sus condiciones para las localidades analizadas.

Localidad	c -	zC_c kWh/m ²	se m ² /p	UP_{c,obj} kWh/p	UP_{c,obj}/UP_{c,obj,0} -
Rosario	1,00	102	15,12	1542	1,00
Mendoza	1,00	124	13,65	1693	1,10
Bariloche	1,00	426	14,34	6107	3,96
Tucumán	1,00	61	12,02	733	0,48
Buenos Aires	1,00	98	16,70	1636	1,06

Tabla 20: Unidad de prestación de refrigeración y sus condiciones para las localidades analizadas.

Localidad	c -	zC_r kWh/m ²	se m ² /p	UP_{r,obj} kWh/p	UP_{r,obj}/UP_{r,obj,0} -
Rosario	1,00	54	15,12	816	1,00
Mendoza	1,00	51	13,65	696	0,85
Bariloche	1,00	-	14,34	-	-
Tucumán	1,00	58	12,02	697	0,86
Buenos Aires	1,00	51	16,70	851	1,04

En la Tabla 21, se exhibe un resumen de lo calculado a efectos de poder comparar, resaltando la cantidad de servicio energético que debe proporcionarse en cada localidad para mantener el confort pretendido, las condiciones que explican esa exigencia y la comparación con los valores de referencia adoptados en este caso para la ciudad de Rosario. Se observa que las unidades de prestación de calefacción presentan valores absolutos más elevados en relación a las unidades de prestación de refrigeración, a excepción de la ciudad de Tucumán, donde son prácticamente similares producto de las condiciones climáticas particulares que tiene Tucumán respecto de las otras ciudades (i.e. un clima más exigente en verano y con inviernos relativamente benignos). Como se anticipó en la Sección 4.1, Bariloche no presenta ningún valor para la unidad de prestación de refrigeración. En lo que respecta a las unidades de prestación de calefacción, las diferencias más importantes se derivan de las condiciones climáticas: Rosario, Mendoza y Buenos Aires tienen climas

similares (clima templado), por lo que sus condiciones climáticas son bastante parecidas; Tucumán (clima cálido) presenta aproximadamente la mitad del valor anterior; mientras que Bariloche (clima frío) aproximadamente cuatro veces el valor. Como el clima de cada localidad se definió a partir de su temperatura media mensual y los valores de irradiancia solar media mensual en el plano horizontal y en cuatro planos verticales, la incidencia en los balances térmicos de aspectos como la amplitud térmica, vientos, humedad no se ven reflejadas en el cálculo. Esta simplificación, que se realizó en aras de compatibilidad con los procedimientos nacionales de etiquetado de viviendas, puede salvarse en caso de aplicar la metodología con balances térmicos más refinados y complejos en las distintas localidades.

Para el caso de las unidades de prestación de refrigeración, Tucumán presenta el valor más alto de condición climática, pero la diferencia con las otras ciudades es pequeña (las principales diferencias entre las ciudades de clima templado y las ciudades de clima cálido se observan en la duración y *dureza* del invierno y no tanto del verano). Notablemente, aunque Tucumán tiene un valor más alto de la condición de la zona climática de refrigeración en comparación con Buenos Aires y Rosario, su unidad de prestación de refrigeración es menor debido a una condición socioeconómica distinta.

Tabla 21: Resumen de unidades de prestación de calefacción y refrigeración, condicionantes y relación con la referencia.

Ciudad	c	se	zc_c	zc_r	UP_{c,obj}	UP_{c,obj}/UP_{c,obj,0}	UP_{r,obj}	UP_{r,obj}/UP_{r,obj,0}
	-	m ² /p	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh/p	—	kWh/p	—
Rosario	1,00	15,12	102	54	1542	1,00	816	1,00
Mendoza	1,00	13,65	124	51	1693	1,10	696	0,85
Bariloche	1,00	14,34	426	-	6107	3,96	-	-
Tucumán	1,00	12,02	61	58	733	0,48	697	0,86
Buenos Aires	1,00	16,70	98	51	1636	1,06	851	1,04

- *Análisis de Sensibilidad de la relación entre Unidades de Prestación respecto de la Definición del Prototipo de Vivienda de Prueba*

Se realizó un análisis de sensibilidad de las relaciones entre las unidades de prestación de calefacción y refrigeración definidas y las de referencia ($UP_{obj}/UP_{obj,0}$), respecto de variaciones en los parámetros de definición del prototipo de vivienda de prueba. Los resultados del análisis se presentan en la Figura 30 tanto para calefacción como para refrigeración, mientras que los valores numéricos detallados se suministran en la Tabla A.11 del Anexo. Los resultados obtenidos muestran que la elección del prototipo específico de vivienda de prueba no altera sustancialmente la relación entre unidades de prestación, ya que para la mayoría de los parámetros las variaciones están acotadas en un 2% y en pocos casos se acerca al 4%, por lo que *podría afirmarse que el método propuesto es robusto*. De todos modos, algunos resultados particulares que emergen de la Figura se explican con detalle en los siguientes párrafos.

Para la unidad de prestación de calefacción, se observó la sensibilidad más alta para los parámetros transmitancia térmica de la envolvente opaca U y factor promedio de ajuste de adyacencias b . Estos dos parámetros son predominantes en la determinación del coeficiente global de intercambio térmico, parámetro muy relevante en el cálculo de requerimientos de energía térmica para calefacción (ISO, 2008). Un resultado particular se detectó en la sensibilidad para el caso de calefacción respecto de variaciones de la transmitancia de envolvente opaca U en la ciudad de Bariloche, donde alcanzó el 7,5%. Este comportamiento puede ser causado por grandes diferencias en las características climáticas de Bariloche con respecto a otros climas (las relaciones entre pérdidas térmicas y ganancias solares son sustancialmente más altas en climas fríos en comparación con climas templados, por lo que la transmitancia de la envolvente se vuelve muy preponderante en el cálculo). El mismo comportamiento, pero menos significativo, se manifestó para Tucumán llegando al 3%.

Para el caso de refrigeración, además de la transmitancia de envolvente opaca y el factor de ajuste promedio, los parámetros relacionados con la gestión de las ganancias térmicas de origen solar α ; $e.S$ se vuelven más relevantes. Este comportamiento se puede explicar debido a que las ganancias solares son mucho más significativas en el cálculo de los requerimientos para refrigeración respecto de calefacción (ISO, 2008).

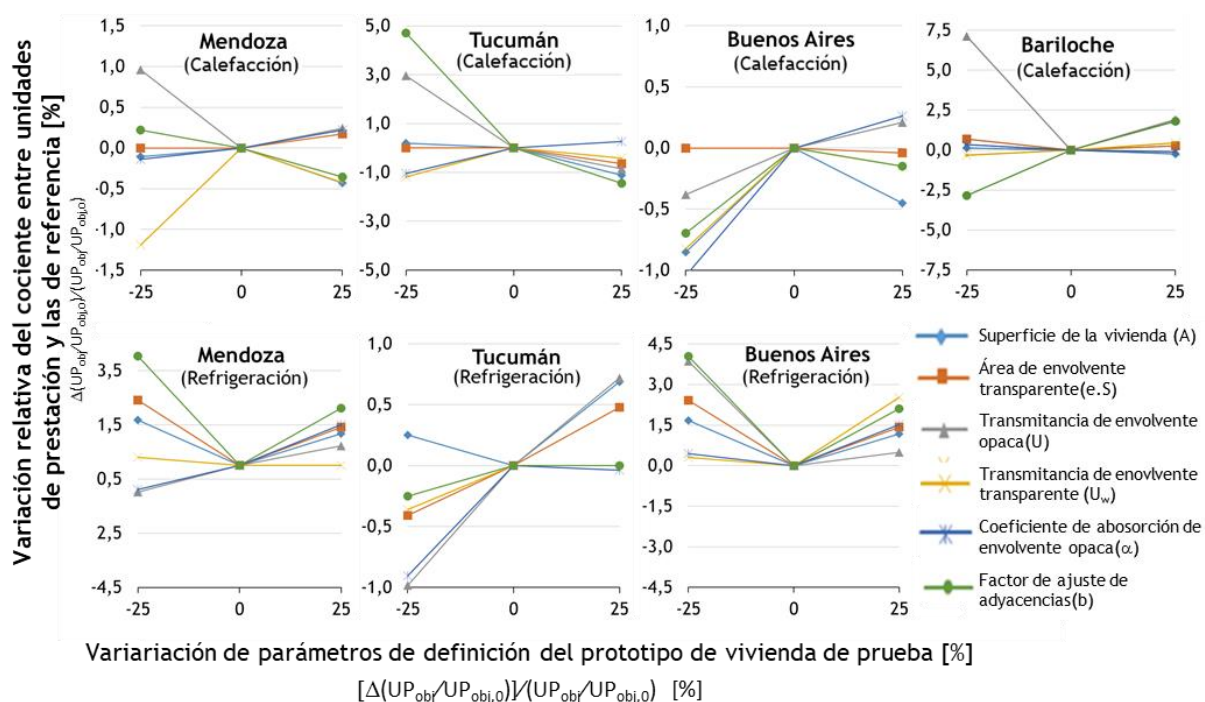


Figura 30: Análisis de sensibilidad de la relación entre unidades de prestación definidas y de referencia ($UP_{obj}/UP_{obj,0}$) respecto de variaciones en los parámetros de definición del prototipo de vivienda de prueba.

- *Extensión del Balance Energético*

El resultado del cálculo de los rendimientos de equipamientos y los rendimientos de contexto, junto con la participación de cada energía secundaria, se muestran en la Tabla 22 para el caso de calefacción y en la Tabla 23 para refrigeración. La desagregación de los rendimientos de equipamiento y contexto presentada en ambas tablas, sumado a la exposición de la participación de cada energético (sólo para el caso de calefacción pues en refrigeración el energético utilizado es exclusivamente electricidad) pone en evidencia las causas de las ineficiencias entre la energía secundaria y la unidad de provisión.

Para el caso de calefacción, la proporción de uso de gas (medido en energía útil) λ_{GN} es altamente predominante en todas las localidades (aproximadamente 0,93) a excepción de Tucumán, donde la proporción es de 0,80. Esto puede deberse a que al ser un clima menos riguroso en el invierno la penetración del gas natural en los hogares es menor respecto de localidades con climas más templados o fríos. Los rendimientos de los equipos de calefacción a gas son similares para las cinco ciudades (aproximadamente 0,70) y lo mismo ocurre con los rendimientos de los equipos eléctricos (aproximadamente 2,2; resultando este valor de un promedio entre sistemas resistivos y bombas de calor caracterizadas por COPs), excepto en Buenos Aires, donde el valor es sustancialmente menor (1,2), mostrando una mayor presencia de calentadores resistivos. Sin embargo, dada la baja cuota de electricidad para calefacción, este valor tiene un impacto insignificante en los resultados finales. Las eficiencias del contexto para calefacción presentan valores de aproximadamente 1,03 para Mendoza y Tucumán, ambas ciudades cercanas a las montañas; alrededor de 1,15 para Rosario y Buenos Aires, ciudades planas; y el valor más alto de 1,38 para la ciudad en el clima más frío (Bariloche).

Respecto de la refrigeración, los rendimientos (COPs) de los equipos son muy similares (aproximadamente 3), y lo mismo ocurre con el rendimiento de contexto (aproximadamente 2). Al igual que lo observado en el caso de calefacción, donde Bariloche presentaba el mayor rendimiento de contexto teniendo el clima más frío, la ciudad más cálida, Tucumán, exhibe la mayor eficiencia de contexto para la refrigeración, advirtiéndose el rol natural del clima como condicionante para configurar la arquitectura del lugar.

Tabla 22: Fracción de unidades de prestación obtenidas de distintos vectores, rendimiento de equipamiento y rendimiento de contexto para calefacción en las localidades analizadas.

Localidad	$\lambda_{GN,c}$	$\lambda_{EE,c}$	$\eta_{e,c}$			$\eta_{c,c}$
			GN	EE	PROM	-
Rosario	0,92	0,08	0,73	2,47	0,78	1,13
Mendoza	0,96	0,04	0,69	2,26	0,71	1,02
Bariloche	0,99	0,01	0,66	2,00	0,67	1,38
Tucumán	0,80	0,20	0,73	2,30	0,85	1,05
Buenos Aires	0,94	0,06	0,69	1,20	0,70	1,18

Tabla 23: Rendimiento de equipamiento y rendimiento de contexto para refrigeración en las localidades analizadas..

Localidad	$\lambda_{EE,r}$	$\eta_{e,r}$	$\eta_{c,r}$
Rosario	1,00	2,99	2,07
Mendoza	1,00	2,82	1,7
Bariloche	-	-	-
Tucumán	1,00	3,25	2,32
Buenos Aires	1,00	2,85	1,82

Los datos de consumo de energía útil, secundaria y primaria derivados del modelo de balance de energía útil realizado conforme los supuestos definidos en la Sección 4.1 se presentan en la Tabla 24 para el uso de calefacción y en la Tabla 25 para el uso de refrigeración, para las cinco localidades analizadas.

Tabla 24: Consumo de energía útil, secundaria y primaria para calefacción de las localidades analizadas.

Localidad	$\tilde{E}_{u,c}$			$\tilde{E}_{s,c}$		$\tilde{E}_{p,c}$	
	Origen GN	Origen EE	TOTAL	GN	EE	kWh	tep
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh		
Rosario	1360	132	1492	1863	53	2505	0,22
Mendoza	1539	72	1611	2230	32	2893	0,25
Bariloche	5154	60	5214	7810	30	9860	0,85
Tucumán	469	118	587	642	51	972	0,08
Buenos Aires	1236	83	1318	1791	69	2466	0,21

Tabla 25: Consumo de energía útil, secundaria y primaria para refrigeración de las localidades analizadas.

Localidad	$\tilde{E}_{u,r}$	$\tilde{E}_{s,r}$	$\tilde{E}_{p,r}$	
	kWh	kWh	kWh	tep
Rosario	798	267	881	0,08
Mendoza	599	213	701	0,06
Bariloche	-	-	-	-
Tucumán	666	205	677	0,06
Buenos Aires	1307	458	1513	0,13

La nueva etapa que se agrega a los balances energéticos tradicionales (i.e. desde la energía útil hasta la prestación) se observa en la Tabla 26.

Tabla 26: Consumo de energía útil, rendimiento de contexto y unidades de prestación garantizadas para calefacción y refrigeración.

Localidad	$\tilde{E}_{u,c}$ kWh	$\eta_{c,c}$ —	UP_c kWh	$\tilde{E}_{u,r}$ kWh	$\eta_{c,r}$ —	UP_r kWh
Rosario	1492	1,13	1691	798	2,07	1658
Mendoza	1611	1,02	1651	599	1,70	1019
Bariloche	5214	1,38	7188	-	-	-
Tucumán	587	1,05	617	666	2,32	1546
Buenos Aires	1318	1,18	1556	1307	1,82	2380

Luego, la Tabla 27 presenta el balance energético extendido para calefacción, en el mismo se incluye el recurso de energía primaria, energías secundarias (gas natural y energía eléctrica en este caso), energía útil, y la unidad de prestación como cuantificación del servicio energético brindado. Del mismo modo, se presenta en la Tabla 28 el balance energético extendido para refrigeración, aquí sólo para la energía secundaria interviniente es la energía eléctrica.

Tabla 27: Balance energético extendido para calefacción.

Localidad	$\tilde{E}_{p,c}$	$\tilde{E}_{s,c}$	$\tilde{E}_{u,c}$			UP_c
	kWh	GN kWh	EE kWh	Origen GN kWh	Origen EE kWh	kWh
Rosario	2505	1863	53	1360	132	1691
Mendoza	2893	2230	32	1539	72	1651
Bariloche	9860	7810	30	5154	60	7188
Tucumán	972	642	51	469	118	617
Buenos Aires	2466	1791	69	1236	83	1556

Tabla 28: Balance energético extendido para refrigeración.

Localidad	$\tilde{E}_{p,r}$ kWh	$\tilde{E}_{s,r}$ kWh	$\tilde{E}_{u,r}$ kWh	UP_r kWh
Rosario	881	267	798	1658
Mendoza	701	213	599	1019
Bariloche	-	-	-	-
Tucumán	677	205	666	1546
Buenos Aires	1513	458	1307	2380

Los principales resultados de la extensión del balance energético tradicional hacia los servicios energéticos se resumen en la Figura 31, donde se presentan las unidades de prestación realmente garantizadas, las definidas, además de los factores de cobertura para las cinco ciudades (en la Tabla 29 se proporcionan resultados numéricos completos).

En el análisis de calefacción, se observa en todas las localidades que los factores de cobertura adquieren valores aproximadamente cercanos a uno, por lo tanto, podría concluirse que en las cinco ciudades, y con todas las simplificaciones e hipótesis preliminares adoptadas, se garantiza el nivel de confort térmico definido. El valor más alto (1,18) corresponde a la ciudad de Bariloche, mientras que el más bajo (0,84) se presenta en Tucumán, resaltando el hecho de que en la ciudad más fría el confort de calefacción está en cierta medida *sobre-garantizado*, mientras que sucede lo contrario en la ciudad más cálida, donde el confort está *sub-garantizado*.

Para el caso de refrigeración, los factores de cobertura son en general más altos respecto de calefacción (valores cercanos a 2), lo que demuestra que, en promedio, el servicio de energía está garantizado en exceso en relación a su definición. Además, la disparidad entre ciudades es más significativa: e.g. Buenos Aires (cerca de 2,80) presenta el valor más alto y Mendoza (alrededor de 1,46) el más bajo. Las diferencias en los factores de cobertura entre ciudades pueden deberse a factores económicos no considerados, como los precios de la energía, subsidios, ingreso disponible, etc., e inclusive motivos comportamentales y culturales. La adopción de un procedimiento de balance térmico simplificado introduce errores en los resultados obtenidos para el verano al no contemplar cuestiones del micro clima como vientos, amplitud térmica, etc., esta podría ser una explicación de la mayor dispersión en los valores de factores de cobertura para refrigeración respecto de calefacción. Utilizando un método de cálculo dinámico se podría mejorar este aspecto.

De comparar los factores de cobertura de calefacción y refrigeración, la relación entre ellos es aproximadamente 1:2, esto evidenciaría que está *sobre-garantizado* el confort de refrigeración, pero también podría deberse a un desajuste en las definiciones de las unidades de prestación en cada caso. Una futura implementación por parte de la autoridad energética debiera contemplar la necesidad de *readaptar* o *ajustar* las definiciones de los condicionantes socioeconómicos y de confort de manera de que sean más consistentes con la realidad. Esta eventual necesidad de ajuste de la metodología recaerá sólo en los resultados absolutos y no relativos, por lo tanto, no se obstruye el principal objetivo de comparación entre distintas localidades y sistemas energéticos.

Tabla 29: Unidades de prestación garantizadas, unidades de prestación definida y factor de cobertura para las localidades analizadas.

Localidad	Calefacción			Refrigeración		
	UP _c kWh	UP _{c,obj} kWh	FC _c —	UP _r kWh	UP _{r,obj} kWh	FC _r —
Rosario	1691	1542	1,10	1658	816	2,03
Mendoza	1651	1693	0,97	1019	696	1,46
Bariloche	7188	6107	1,18	-	-	-
Tucumán	617	733	0,84	1546	697	2,22
Buenos Aires	1556	1636	0,95	2380	851	2,80

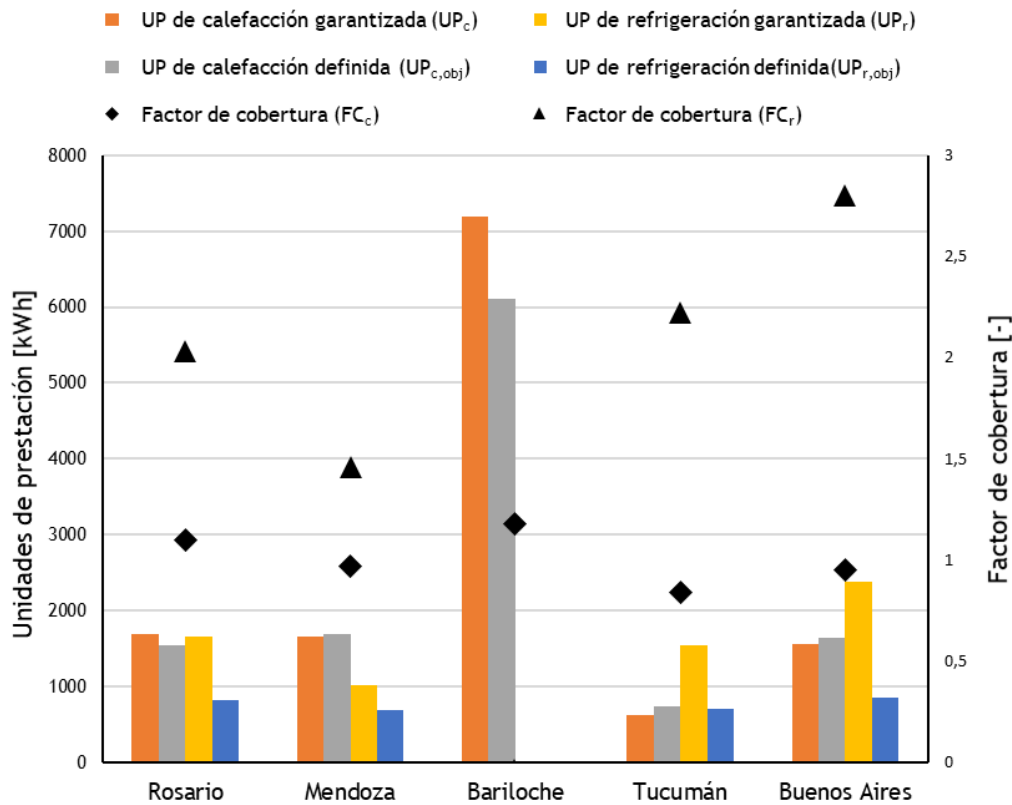


Figura 31: Unidades de prestación definidas, garantizadas, y factor de cobertura para las localidades analizadas.

4.2.2. Nivel de Acoplamiento entre Calidad y Exigencia

Las exigencias de las unidades de prestación de calefacción y refrigeración para las localidades estudiadas, como así también las temperaturas de confort y las temperaturas mínimas y máximas de diseño con las cuales se calcularon las exigencias se presentan en la Tabla 30. Se observa que la exigencia de la unidad de prestación de calefacción se sitúa aproximadamente en 0,065 presentando Rosario, Mendoza y Buenos Aires valores muy cercanos, Tucumán el menor valor y Bariloche la mayor exigencia. En el caso de refrigeración los valores son muy bajos, siendo el menor de todos el que se observa para la ciudad de Buenos Aires (esto se explica por el hecho de que la temperatura máxima de diseño es de 29°C). Si bien existen diferencias al comparar las distintas localidades, tanto para calefacción como para refrigeración, lo significativo de este resultado es que ambas demandas son muy poco exigentes pues el contenido exergético que necesitan en los flujos de energía son muy bajos.

Tabla 30: Exigencia de las unidades de prestación de calefacción y refrigeración para las localidades analizadas.

Localidad	$\theta_{\text{conf,c}}$ °C	$\theta_{\text{conf,r}}$ °C	$\theta_{\text{mín}}$ °C	$\theta_{\text{máx}}$ °C	UP _c kWh	EUP _c -	UP _r kWh	EUP _r -
Rosario	20	26	2	33	1542	0,061	816	0,022
Mendoza	20	26	-1	34	1693	0,065	696	0,026
Bariloche	20	26	-3	22	6107	0,078	-	-
Tucumán	20	26	5	33	733	0,051	697	0,022
Buenos Aires	20	26	0	29	1636	0,068	851	0,010

El nivel de acoplamiento entre exigencia y calidad, junto con los indicadores necesarios para su cálculo se presentan en la Tabla 31 para el caso de calefacción, y en la Tabla 32 para refrigeración, además de presentarse en forma gráfica (Figura 32 y Figura 33). Como el gas natural y la energía eléctrica tienen un alto contenido exergético, y las demandas son poco exigentes, resulta evidente el *derroche de calidad* que se produce al utilizar vectores muy valiosos para estas demandas. Prácticamente no existen diferencias entre las diferentes localidades, pues en todos los casos el patrón es el mismo. Este resultado interpela los tradicionales paradigmas de los sistemas energéticos e invita a repensar que ciertas demandas podrían satisfacerse a partir de subproductos o pérdidas de otras demandas más exigentes (e.g. cogeneración).

Tabla 31: Exergías relativas en energía útil y secundaria, y *acoplamiento entre calidad y exigencia* de calefacción para las localidades analizadas.

Localidad	EUP _c	Ex(Eu)/Eu	ϵ_u	Ex(Es)/Es		ϵ_s		PROM
				GN	EE	GN	EE	
Rosario	0,061	0,210	0,293	0,940	1,000	0,065	0,061	0,065
Mendoza	0,065	0,213	0,305	0,940	1,000	0,069	0,064	0,069
Bariloche	0,078	0,224	0,350	0,940	1,000	0,083	0,078	0,083
Tucumán	0,051	0,201	0,254	0,940	1,000	0,054	0,051	0,054
Buenos Aires	0,068	0,215	0,317	0,940	1,000	0,073	0,068	0,072

Tabla 32: Exergías relativas en energía útil y secundaria, y *acoplamiento entre calidad y exigencia* de refrigeración para las localidades analizadas.

Localidad	EUP _r	Ex(Eu)/Eu	ϵ_u	Ex(Es)/Es	ϵ_s
Rosario	0,023	0,075	0,304	1,000	0,023
Mendoza	0,026	0,078	0,333	1,000	0,026
Bariloche	-	0,041	-	1,000	-
Tucumán	0,022	0,075	0,304	1,000	0,022
Buenos Aires	0,010	0,063	0,158	1,000	0,010

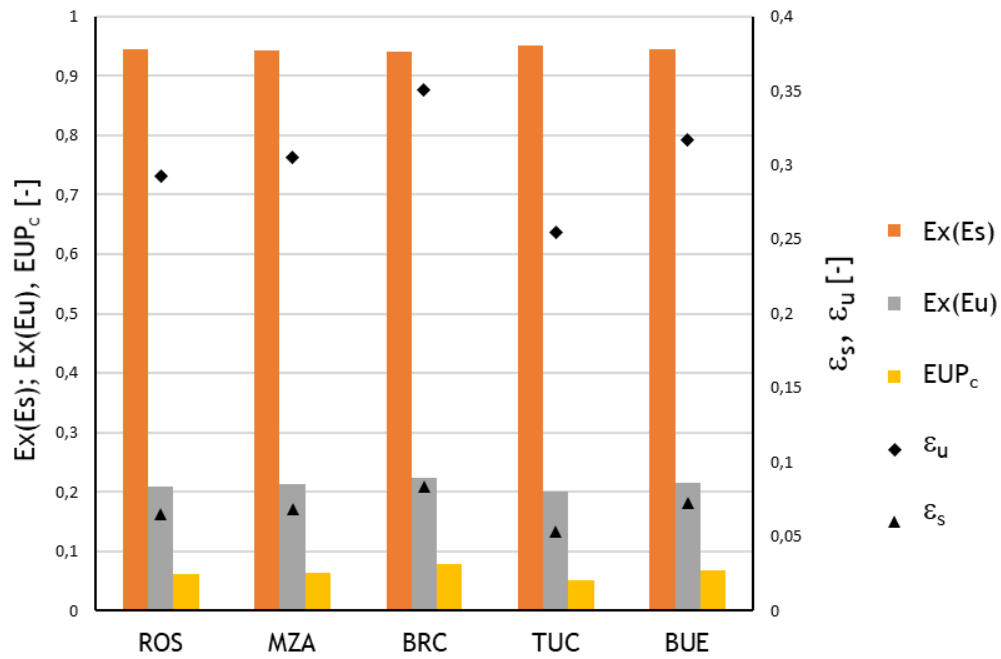


Figura 32: Acoplamiento de calidad de energía secundaria y energía útil con exigencia de la prestación de calefacción.

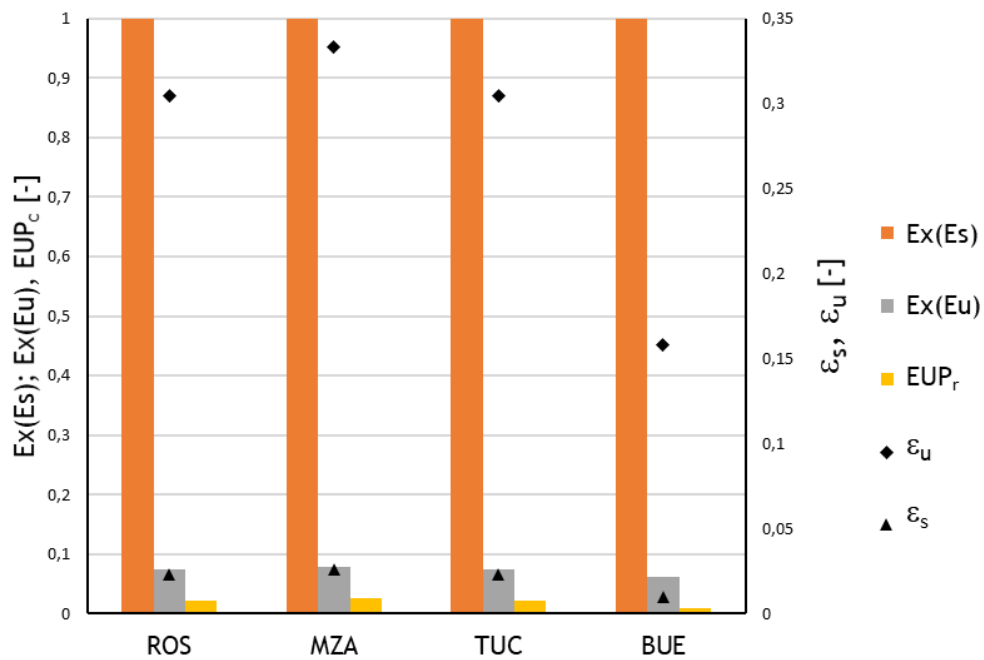


Figura 33: Acoplamiento de calidad de energía secundaria y energía útil con exigencia de la prestación de refrigeración.

4.2.3. Evaluación del Costo Energético Primario

El resumen de los indicadores del balance energético extendido y el costo energético primario de la unidad de calefacción y refrigeración para la ciudad promedio, calculado mediante el modelo IO, para los cuatro escenarios de eficiencia energética en el uso final se muestran en la Tabla 33. En este caso para la consideración del costo energético primario se consideraron los recursos energéticos primarios que ingresan al balance energético, la energía embebida en los bienes y servicios que necesita el sector energético para funcionar (e.g. centrales, gasoductos, electroductos, etc.) y la energía embebida en los bienes y servicios necesarios para ocasionar las mejoras entre diferentes escenarios. En el *Escenario 1* se observa un aumento del rendimiento del equipamiento solamente; en el *Escenario 2* aumenta el rendimiento de contexto mientras que en el *Escenario 3* aumentan ambos rendimientos. Resulta evidente que, si bien los sucesivos escenarios muestran reducciones en el consumo de energía secundaria, el impacto en el costo energético primario no decrece con la misma tendencia, debido a las contribuciones indirectamente requeridas para realizar esas mejoras. El *Escenario 1*, donde sólo se actualizan los equipos, y no se involucran materiales de aislamiento, presenta el costo energético primario más bajo. A modo comparativo, en la Tabla 34, se exhiben los mismos resultados pero sin haber considerado la energía embebida en los bienes y servicios involucrados en las mejoras, observándose aquí sí una mayor correlación entre reducción de consumo de energía secundaria y reducción del costo de energía primaria.

Tabla 33: Balance energético extendido y costo energético primario de calefacción y refrigeración para los escenarios analizados, considerando impactos directos e indirectos de las intervenciones.

	UP kWh	UP _{obj} kWh	FC —	η_c —	$\tilde{E}_u$ kWh	η_e —	$\tilde{E}_{s,GN}$ kWh	$\tilde{E}_{s,EE}$ kWh	C _{p,UP} tep
Escenario 0									
Calefacción	1691	1542	1,10	1,13	1492	0,78	1863	53	0,0940
Refrigeración	1658	816	2,03	2,08	798	2,99	-	267	0,0214
Total									0,1154
Escenario 1									
Calefacción	1691	1542	1,10	1,13	1492	3,5	0	426	0,0357
Refrigeración	1658	816	20,3	2,08	798	3,5	-	228	0,0199
Total									0,0556
Escenario 2									
Calefacción	1691	1542	1,10	3,54	477	0,78	596	17	0,0452
Refrigeración	1658	816	2,03	3,99	415	2,99	-	139	0,0263
Total									0,0715
Escenario 3									
Calefacción	1691	1542	1,10	3,54	477	3,5	0	136	0,0311
Refrigeración	1658	816	2,03	3,99	415	3,5	-	119	0,0297
Total									0,0608

Tabla 34: Balance energético extendido y costo energético primario de calefacción y refrigeración para los escenarios analizados, considerando sólo impactos directos derivados de la reducción de consumo de energía.

	UP kWh	UP _{obj} kWh	FC —	η_c —	$\tilde{E}_u$ kWh	η_e —	$\tilde{E}_{s,GN}$ kWh	$\tilde{E}_{s,EE}$ kWh	C _{p,UP} tep
Escenario 0									
Calefacción	1691	1542	1,10	1,13	1492	0,78	1863	53	0,0940
Refrigeración	1658	816	2,03	2,08	798	2,99	-	267	0,0214
Total									0,1154
Escenario 1									
Calefacción	1691	1542	1,10	1,13	1492	3,5	0	426	0,0342
Refrigeración	1658	816	20,3	2,08	798	3,5	-	228	0,0183
Total									0,0525
Escenario 2									
Calefacción	1691	1542	1,10	3,54	477	0,78	596	17	0,0301
Refrigeración	1658	816	2,03	3,99	415	2,99	-	139	0,0116
Total									0,0417
Escenario 3									
Calefacción	1691	1542	1,10	3,54	477	3,5	0	136	0,0109
Refrigeración	1658	816	2,03	3,99	415	3,5	-	119	0,0095
Total									0,0204

Finalmente, las diferencias que emergen de utilizar las dos formas de contabilización se exhiben en la Figura 34, y con detalle en la Tabla 35. En la misma se advierte que si bien las diferencias en el criterio de contabilización son poco significativas en el Escenario 1, estas se vuelven muy importantes en los Escenarios 2 y 3 (debido al involucramiento de materiales aislantes), lo que refleja la importancia de una evaluación general de las políticas de eficiencia energética en usos finales. Incluso puede observarse que el costo primario de la unidad de prestación de refrigeración para los Escenarios 2 y 3 es más alto que en el escenario base, evidenciando que la mejora en el consumo de energía para refrigeración, debido a un aumento de aislación, no lograría compensar el mayor consumo para producción de aislantes. De todos modos, al hacer una evaluación total del costo primario, i.e. calefacción y refrigeración, el costo primario de ambos servicios energéticos resulta menor que en el escenario base ya que la aislación tiene un gran efecto en el ahorro de energía para calefacción.

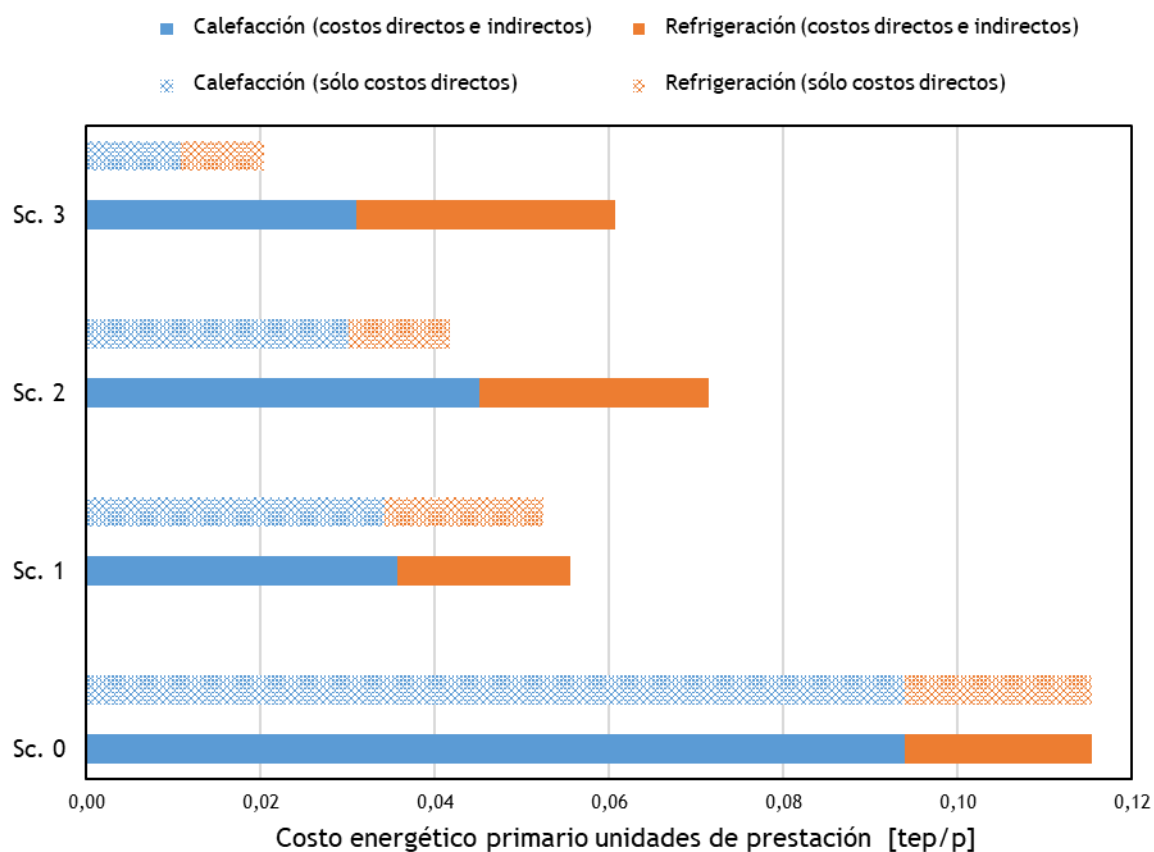


Figura 34: Diferencias en el costo energético primario para los escenarios analizados bajo distintos criterios de contabilización.

Tabla 35: Diferencias en el costo energético primario para los escenarios analizados bajo distintos criterios de contabilización.

Escenario	Sólo costos directos			Costos directos e indirectos			Diferencia		
	tep/p			tep/p			%		
	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total	Calefacción	Refrigeración	Total
0	0,0940	0,0214	0,1154	0,0940	0,0214	0,1154	0,00	0,00	0,00
1	0,0342	0,0183	0,0525	0,0357	0,0199	0,0556	4,39	8,74	5,90
2	0,0301	0,0116	0,0417	0,0452	0,0263	0,0715	50,17	126,72	71,46
3	0,0109	0,0095	0,0204	0,0311	0,0297	0,0608	185,32	212,63	198,04

5. Conclusiones

El análisis de los sistemas energéticos y de las políticas asociadas a los mismos, se realizan en la actualidad mayoritariamente desde el punto de vista de la oferta. Al estar las tradicionales metodologías de elaboración de balances energéticos nacionales y regionales enmarcadas en dicho paradigma, las mismas no son capaces de brindar suficiente información respecto de los procesos de consumo final de la energía. En primer lugar, no permiten cuantificar los servicios energéticos obtenidos del uso de la energía; en segundo lugar, no observan la degradación de la calidad de los flujos energéticos al ignorar la calidad de la energía que se utiliza para satisfacer las distintas demandas; y finalmente no reflejan los consumos indirectos debido a la energía embebida en bienes y servicios que forman parte del contexto bajo el cual se brindan los servicios energéticos. Estas limitaciones de las metodologías tradicionales de balances energéticos imposibilitan la elaboración, diseño, implementación y posterior evaluación de políticas públicas de eficiencia energética en los consumos finales de energía, siendo estas políticas las que presentan un gran potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para los próximos decenios.

A partir de la propuesta metodológica formalizada en el Capítulo 3, se pueden complementar los balances energéticos tradicionales de energía secundaria o energía útil, sumando a los mismos las siguientes posibilidades: (a) Cuantificación de los servicios energéticos mediante el concepto de unidad de prestación, y su institución como la etapa final de todo el sistema energético, permitiendo un análisis desagregado de las eficiencias que actúan en cascada desde la energía secundaria hasta el servicio energético final (i.e. rendimiento de equipamientos y de contexto); (b) Análisis del acoplamiento entre la calidad de un determinado flujo energético y la exigencia del servicio energético que se satisface a partir del mismo, recurriendo para ello al concepto de exergía; (c) Contabilización del consumo indirecto de los servicios de producción, transporte y distribución de energía, y de la energía embebida en los bienes y servicios involucrados en las mejoras de la eficiencia del uso final, utilizando para este propósito el Análisis IO.

La metodología propuesta en el presente trabajo de investigación presenta la ventaja de ser de fácil aplicación, de forma parcial o total según el límite y el alcance definido, y utilizando datos de estadísticas energéticas y de los sistemas de cuentas nacionales ya disponibles por parte de los países. La aplicación de la primera y segunda etapa de la metodología, incluso podría realizarse en una resolución menor a la localidad, considerando categorías de desagregación territoriales, sociales, económicos, siempre que el organismo encargado de la aplicación posea la información necesaria y proceda con los criterios estadísticos pertinentes. Para la aplicación de la tercera etapa de la metodología son necesarias las Matrices Insumo Producto o los Cuadros de Oferta y Utilización del país analizado, siendo esto una barrera para la aplicación en países que no cuenten con estos datos actualizados. Asimismo, la propuesta es compatible con los datos de estadísticas energéticas proporcionados actualmente por la Agencia Internacional de la Energía, posibilitando la comparabilidad entre distintos países. Si bien la metodología fue desarrollada para los usos de calefacción y refrigeración de ambientes, sus principios regidores pueden servir de marco para la definición de unidades de prestación de otros usos del sector residencial como así también de usos de los otros cuatro sectores de consumo final.

El caso de aplicación permitió observar la cantidad de datos y resultados que se desprenden al complementar los balances energéticos tradicionales con la metodología propuesta. Estos datos evidencian indicadores que los balances energéticos tradicionales no están en condiciones de proporcionar: caracterización de niveles de servicio energético que debe proporcionarse para distintas localidades, nivel de prestación garantizado para un determinado uso, ineficiencias en los equipamientos y en los contextos en los que se lleva a cabo la transformación energía secundaria en energía útil y posteriormente en servicio energético, correlación entre la calidad del energético utilizado y la exigencia del servicio energético para el que se utiliza, efectos indirectos en el consumo de energía primaria debido a la energía embebida en bienes y servicios involucrados en posibles intervenciones de eficiencia energética.

Si bien los resultados que se obtuvieron de aplicar la metodología en cinco localidades son sólo a efectos demostrativos, dada la imposibilidad de hacer inferencia a partir de una muestra que no es representativa, y ya fueron discutidos en el Capítulo 4, en modo general los mismos permitieron observar las siguientes características asociadas al uso final de la energía en las localidades analizadas:

- Las unidades de prestación de calefacción y refrigeración definidas para cada localidad analizada presentan valores diferenciados, fuertemente influenciados por el clima y en menor medida por el contexto socioeconómico.
- En términos generales las unidades de prestación de calefacción están garantizadas, i.e. se proporcionan en cantidad muy cercana a la cantidad definida para cada localidad, mientras que en el caso de refrigeración se proporcionan en valores más altos a los definidos, entendiéndose entonces que existe un *sobreconfort* de refrigeración.
- En usos de refrigeración, la ciudad de Buenos Aires presenta el mayor nivel de *sobreconfort*, mientras que Mendoza presenta el mayor nivel de *subconfort*.
- En usos de calefacción, la ciudad de Bariloche presenta el mayor nivel de *sobreconfort*, aunque muy cercano al nivel definido, mientras que Tucumán presenta el mayor nivel de *subconfort*. Queda en evidencia aquí una tendencia a aumentar la pretensión de confort a medida que el clima se hace más severo y relajarla en sentido inverso.
- El gran desacoplamiento entre calidad de energía secundaria y nivel de exigencia del servicio energético interpela los tradicionales paradigmas de conversión de energía para calefacción y refrigeración en el sector residencial, invitando a considerar el hecho de que ciertas demandas podrían satisfacerse a partir de subproductos o pérdidas de otras demandas más exigentes (e.g. cogeneración), como se realiza en algunas aplicaciones industriales. Al ser los servicios energéticos de calefacción y refrigeración de poca exigencia, y no existir tanto desacoplamiento entre esta exigencia y la calidad de la energía útil que erogan los equipamientos, la gran destrucción de exergía se da en el proceso de conversión de energía secundaria a energía útil, y esto sólo podría solucionarse bajando la calidad de la energía secundaria que se utiliza. El estudio de alternativas tanto en el uso de subproductos de otros procesos energéticos más exigentes, como la utilización de otros vectores de menor calidad constituyen un desafío no sólo tecnológico sino también gestional que incluso implicaría una nueva planificación urbana. La cogeneración a escala doméstica o

condominial y la climatización distrital podrían ser opciones para futuras investigaciones, que persigan el fin de acercar la calidad entre la oferta energética y la exigencia de la unidad de prestación.

- Contabilizando efectos directos e indirectos en el consumo de energía primaria, la sustitución de equipos de calefacción a gas por bombas de calor y el mejoramiento del COP de los refrigeradores presentan un mejor resultado en ahorro de energía primaria respecto de las intervenciones de aislación de muros y cubiertas. Si se hiciera un análisis puramente energético sin considerarse las mejoras en la habitabilidad de las viviendas, y el tipo de confort que una mayor aislación brindaría, este punto justificaría la elección de políticas de sustitución de equipos por sobre políticas de mejora en la envolvente.

Cada una de las conclusiones particulares obtenidas a partir del caso de aplicación podría constituirse en un insumo para los *policy-makers* a fines de utilizar o direccionar instrumentos de política pública, mencionándose a continuación sólo algunas posibilidades:

- Establecimiento de cuadros tarifarios que consideren las unidades de prestación definidas para cada localidad.
- Adopción del indicador factor de cobertura como criterio para la definición de pobreza energética, y bienestar energético.
- Establecimiento de bandas de consumo de energía diferenciadas a efectos de penalizar los sobreconsumos de refrigeración y a su vez incentivar los consumos mínimos que garanticen factores de cobertura cercanos a uno.
- Programas de migración y sustitución de fuentes y equipamientos específicos para cada localidad, atendiendo a los factores de cobertura específicos y acoplamientos entre calidad y exigencia.
- Programas de incentivos para intervenciones de eficiencia energética en el sector residencial cuya evaluación considere la *energía primaria evitada en forma integral (considerando tanto efectos directos como indirectos)*, de forma de poder comparar los recursos económicos destinados a estos programas con los recursos económicos que habitualmente se destinan a los sectores de producción y generación de energía, en especial a la promoción de energías renovables.

A su vez, la información adicional que emerge de aplicar la presente metodología permitiría aplicar un criterio de selectividad para la realización de estudios más avanzados que signifiquen asignación de importantes cantidades de recursos, como ser encuestas, trabajos de campo, etc., habilitando la posibilidad de indagar en las causas de ciertos patrones de consumo que se pretendan corregir o intervenir.

A partir de los resultados de la investigación se pueden identificar posibles estudios y desarrollos futuros. En primer lugar, sería interesante aplicar la presente metodología a todo el país con el adecuado trabajo estadístico necesario, luego se podría avanzar en el diseño de alguna política integral de eficiencia energética para usos de calefacción y refrigeración en el sector residencial a partir de los resultados obtenidos. Asimismo, esta metodología podría completarse definiendo unidades de prestación para otros usos del sector residencial y también usos de otros sectores (e.g. transporte, industria, comercial y público); y finalmente, podría adaptarse la tercera etapa de la propuesta para evaluar el impacto en el consumo de energía primaria, no

debido a cambios en la demanda final de *commodities energéticos*, sino como consecuencia de un aumento en la eficiencia energética en los sectores de consumo intermedio (i.e. industria y servicios).

Publicaciones del Autor

Publicaciones científicas

Stagnitta R G, Rocco M V, Colombo E. A Complementary Approach to Traditional Energy Balances for Assessing Energy Efficiency Measures in Final Uses: The Case of Space Heating and Cooling in Argentina. Sustainability 2020;12:6563. <https://doi.org/10.3390/su12166563>.

Stagnitta, R., Coronato, T., Gastón, A., Cervera, C., Abalone, R., 2019. Evaluación energética de un prototipo de vivienda según norma IRAM 11900:2017. Requerimientos de climatización para distintas localizaciones. Acta la XLII Reun. Trab. la Asoc. Argentina Energías Renov. y Medio Ambient. 7, 01.25-01.36.

Stagnitta, R., Gastón, A., Abalone, R., 2018. Modelo analítico para estimar el consumo energético de viviendas en régimen dinámico. Parte 2: Requerimiento de energía para calefacción de una vivienda para un mes específico. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient. 22, 01.25-01.36 ISSN 2314-1433.

Stagnitta, R., Abalone, R., Gastón, A., 2017. Modelo analítico para estimar el consumo energético de viviendas en régimen dinámico. Parte 1: Análisis del flujo de energía a través de muros. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient. 21, 08.167-02.178 ISSN 2314-1433.

Publicaciones de divulgación científica

Stagnitta, R. 2018. Una mirada a la Eficiencia Energética desde el punto de vista de la demanda y los usos finales. Hojitas de Conocimiento. Instituto de Energía y Desarrollo Sostenible. Comisión Nacional de Energía Atómica. Edición Especial 2018 *Eficiencia Energética*. ISBN 978-987-1323-12-8.

Stagnitta, R. 2017. Proyecto de Etiquetado de Viviendas – Provincia de Santa Fe. Edición Especial de la XL Reunión de Trabajo de ASADES. Mesa Redonda *Eficiencia Energética Edilicia*. Silvia de Schiller, Editora. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient. 21, 01.22-01.31 ISSN 2314-1433.

Actividades de Transferencia al Medio realizadas por el Autor

Participación en la redacción de la Ley Provincial 13.903 “Certificación de Eficiencia Energética de Inmuebles destinados a Vivienda” sancionada el 30 de octubre del año 2019.

Miembro del Subcomité de Eficiencia Energética en Edificios, organismo de estudio de la NORMA IRAM 11900:2017. Prestaciones Energéticas en Viviendas. Método de Cálculo.

Dictado de los 14 Cursos de Etiquetado de Viviendas en el marco del Programa Provincial de Etiquetado de Viviendas de la Provincia de Santa Fe y del Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas.

- Rosario. Marzo de 2017.
- Santa Fe. Noviembre de 2017
- Rosario. Abril de 2018.
- Santa Fe. Abril de 2018.
- San Carlos de Bariloche. Junio de 2018.
- Mendoza y Godoy Cruz. Agosto de 2018.
- Rosario. Octubre de 2018.
- San Miguel de Tucumán. Noviembre de 2018.
- Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Marzo de 2019.
- Salta. Mayo de 2019.
- Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Julio de 2019.
- Rosario. Agosto de 2019.
- Rosario. Septiembre de 2019.
- Rosario. Octubre de 2019.

Miembro del Equipo Consultor de la Consultoría Internacional para realización de Prueba Piloto de Etiquetado Energético de Viviendas en Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Proyecto Mecanismos y Redes de Transferencia de Tecnologías Relacionadas con el Cambio Climático en América Latina y el Caribe (RG – T2384. Proyecto financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo, ejecutado por Fundación Bariloche, siendo beneficiaria la Agencia de Protección Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y en colaboración con la Secretaría de Gobierno de Energía de la Nación. Años 2019 – 2020.

Director y Docente de la Diplomatura Universitaria en Eficiencia Energética y Energías Renovables de la Universidad Nacional de Rafaela, en carácter de profesor invitado. Años 2018 – 2020.

Docente de la Asignatura Optativa Introducción a la Política Energética en la Maestría en Energías para el Desarrollo Sostenible. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Años 2017.

Director de Tesis de Maestría del Ing. Ezequiel Machaín. Gestión de Eficiencia Energética en el Sector Industrial. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Jurado de Tesis de Maestría del Ing. Eduardo Pavani. Implementación de la Administración Empresaria para una Planta de Almacenamiento y Distribución de Energía en Argencina con Eficiencia Energética, generando Impacto Ambiental Positivo. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Bibliografía

- Afionis, S., Sakai, M., Scott, K., Barrett, J., Gouldson, A., 2017. Consumption-based carbon accounting: does it have a future? *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1002/wcc.438>
- Azapagic, A., Clift, R., 1999. Life cycle assessment and multiobjective optimisation. *J. Clean. Prod.* [https://doi.org/10.1016/s0959-6526\(98\)00051-1](https://doi.org/10.1016/s0959-6526(98)00051-1)
- Bejan, A., 2016. *Advanced Engineering Thermodynamics*, Advanced Engineering Thermodynamics. <https://doi.org/10.1002/9781119245964>
- Bligh, D.C., Ismet Ugursal, V., 2012. Extended exergy analysis of the economy of Nova Scotia, Canada. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.061>
- Brodyansky, V.M., Sorin, M., & Goff, P.L., 1994. The Efficiency of Industrial Processes: Exergy Analysis and Optimization. *Energy Res.*
- Bullard, C.W., Herendeen, R.A., 1975. The energy cost of goods and services. *Energy Policy*. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(75\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0301-4215(75)90035-X)
- Carson, C.S., 1995. Integrated economic and environmental satellite accounts. *Nonrenewable Resour.* <https://doi.org/10.1007/bf02257015>
- Chapman, P.F., Faculty, S., 1975. 4. The energy costs of materials. *Energy Policy*. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(75\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(75)90053-1)
- Chapman, P.F., Leach, G., Slessor, M., 1974. 2. The energy cost of fuels. *Energy Policy*. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(74\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0301-4215(74)90048-2)
- Chen, S., Chen, B., 2015. Urban energy consumption: Different insights from energy flow analysis, input-output analysis and ecological network analysis. *Appl. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.055>
- Commission on Environment, W., 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4.
- Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., 1993. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A “Code of Practice,” in: The SETAC Workshop.
- Cornelissen, R.L., 1997. Thermodynamics and sustainable development: The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. FEBODRUK BV, Enschede, Netherlands.
- Cravioto, J., Yamasue, E., Okumura, H., Ishihara, K.N., 2014. Energy service satisfaction in two Mexican communities: A study on demographic, household, equipment and energy related predictors. *Energy*

Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.031>

Cullen, J.M., Allwood, J.M., 2010a. The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.054>

Cullen, J.M., Allwood, J.M., 2010b. The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.054>

Cullen, J.M., Allwood, J.M., 2010c. Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.024>

Davies, M.G., 2006. Building heat transfer, *Building Heat Transfer*. <https://doi.org/10.1002/0470020555>

Dietzenbacher, E., Lahr, M.L., 2004. Wassily leontief and input-output economics, *Wassily Leontief And Input-Output Economics*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511493522>

Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, W.W.B.I., 1972. *The Limits to Growth*, New American Library. Universe Books. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(73\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0007-6813(73)90029-3)

El-Sayed, Y.M., Evans, R.B., 1970. Thermoeconomics and the design of heat systems. *J. Eng. Gas Turbines Power*. <https://doi.org/10.1115/1.3445296>

Ertesvåg, I.S., 2005. Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.025>

Ertesvåg, I.S., Mielnik, M., 2000. Exergy analysis of the Norwegian society. *Energy*. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00025-6)

European Union, 2013. Manual for statistics on energy consumption in households, in: *Manuals and Guidelines - Environment and Energy*. <https://doi.org/10.2785/45686>

Evans, R.B., Tribus, M., 1965. Thermo-economics of saline water conversion. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* <https://doi.org/10.1021/i260014a014>

Fell, M.J., 2017. Energy services: A conceptual review. *Energy Res. Soc. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.010>

Fernández, R., 2015. Resumen y conclusiones para un futuro energético sustentable. *Escenarios Energéticos Argentina 2035*. Buenos Aires.

Flórez-Orrego, D., Silva, J.A.M., Oliveira, S. De, 2015. Exergy and environmental comparison of the end use of vehicle fuels: The Brazilian case. *Energy Convers. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.074>

Font de Mora, E., Torres, C., Valero, A., 2012. Assessment of biodiesel energy sustainability using the exergy return on investment concept. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.072>

- Fouquet, R., 2018. Energy Services, in: The New Palgrave Dictionary of Economics.
https://doi.org/10.1057/978-1-349-95189-5_3026
- Fujimori, S., Matsuoka, Y., 2011. Development of method for estimation of world industrial energy consumption and its application. Energy Econ. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.01.010>
- Fundación Bariloche, Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, 2009. Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional. Montevideo.
- Gaggioli, R.A., El-Sayed, Y.M., Ei-Nashar, A.M., Kamaluddin, B., 1988. Second law efficiency and costing analysis of a combined power and desalination plant. J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME. <https://doi.org/10.1115/1.3231364>
- Gaggioli, R.A., Richardson, D.H., Bowman, A.J., 2002. Available energy - Part I: Gibbs revisited. J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME. <https://doi.org/10.1115/1.1448336>
- Gálvez, F.N., 2012. Modelos multisectoriales input-output en el estudio de los impactos ambientales : Una aplicación a la economía de Cataluña. TDX (Tesis Dr. en Xarxa).
- Gasparatos, A., El-Haram, M., Horner, M., 2009. Assessing the sustainability of the UK society using thermodynamic concepts: Part 2. Renew. Sustain. Energy Rev. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.005>
- Gastiarena, M., Gil, S., 2017. Gas versus electricidad: uso de la energía en el sector residencial. Petrotecnia.
- Grübler, A., Nakićenović, N., Victor, D.G., 1999. Dynamics of energy technologies and global change. Energy Policy. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(98\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(98)00067-6)
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Gorée, M., 2002. life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Netherlands Minist. <https://doi.org/10.1007/BF02978784>
- Haas, R., 1997. Energy efficiency indicators in the residential sector. Energy Policy. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(97\)00069-4](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(97)00069-4)
- Haas, R., Nakicenovic, N., Ajanovic, A., Faber, T., Kranzl, L., Müller, A., Resch, G., 2008. Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies. Energy Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.028>
- Heijungs, R., Suh, S., 2002. The refined model for inventory analysis. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9900-9_3
- Hendrickson, C.T., Lave, L.B., Matthews, H.S., Horvath, A., Joshi, S., McMichael, F.C., MacLean, H.L., Cicas, G., Matthews, D., Bergerson, J., 2006. Environmental life cycle assessment of goods and

services: An input-output approach, Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. <https://doi.org/10.4324/9781936331383>

Hernández, G., 2012. Matrices Insumo-Producto y Análisis de Multiplicadores: Una Aplicación Para Colombia. Rev. Econ. Inst.

Herrera, A.O., Scolnick, H.D., Chichilnisky, G., Gallopin, G.C., Hardoy, J.E., Mosovich, D., Oteiza, E., De Romero Brest, G.L., Suárez, C.E., Talavera, L., 1977. ¿Catastrofe o Nueva Sociedad? Modelo Mundial Latinoamericano 30 años después. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Buenos Aires.

Hong, J., Shen, G.Q., Guo, S., Xue, F., Zheng, W., 2016. Energy use embodied in China's construction industry: A multi-regional input-output analysis. Renew. Sustain. Energy Rev. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.068>

Hu, S., Yan, D., Guo, S., Cui, Y., Dong, B., 2017. A survey on energy consumption and energy usage behavior of households and residential building in urban China. Energy Build. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.064>

Hunt, L.C., Ryan, D.L., 2015. Economic modelling of energy services: Rectifying misspecified energy demand functions. Energy Econ. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.006>

Instituto de Estadísticas y Censos de Argentina, 2010. Censo 2010 Argentina resultados definitivos: mapas [WWW Document]. INDEC. Censo Nac. Población, Hogares y Viviendas 2010. Inst. Geográfico Nac. e INDEC, datos Superf.

International Energy Agency, 2018a. World Energy Statistics 2018, International Energy Agency. https://doi.org/10.1787/world_energy_stats-2018-en

International Energy Agency, 2018b. 2018 World Energy Outlook: Executive Summary. Oecd/lea.

International Energy Agency, 2017. Energy Efficiency Indicators Highlights (2017 edition). Int. Energy Agency. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

International Energy Agency, 2016. World Energy Balances 2016, World Energy Balances. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264263116-en>

International Energy Agency, 2014a. Energy Efficiency Indicators : Fundamentals on Statistics. Int. Energy Agency, Paris.

International Energy Agency, 2014b. Energy Efficiency Indicators : Essentials for Policy Making. Int. Energy Agency.

International Federation of Institutes for Advanced Studies, 1978. IFIAS Workshop Report, energy analysis and economics. Resour. Energy. [https://doi.org/10.1016/0165-0572\(78\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0165-0572(78)90004-X)

- International Organisation for Standardization, 2011. ISO 50001 - Energy Management, International Organization for Standardization.
- IRAM, 2017. 11900. Prestaciones energéticas en viviendas. Método de Cálculo.
- Irrek, W., Thomas, S., 2008. Defining Energy Efficiency. Wuppertal Inst. Work. Pap.
- ISO, E.N., 2008. 13790: Energy performance of buildings—Calculation of energy use for space heating and cooling (EN ISO 13790: 2008). Eur. Comm. Stand. (CEN), Brussels.
- Jakob, M., Steckel, J.C., Edenhofer, O., 2014. Consumption- Versus Production-Based Emission Policies. *Annu. Rev. Resour. Econ.* <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012342>
- Jonsson, D.K., Gustafsson, S., Wangel, J., Höjer, M., Lundqvist, P., Svane, Ö., 2011. Energy at your service: Highlighting energy usage systems in the context of energy efficiency analysis. *Energy Effic.* <https://doi.org/10.1007/s12053-010-9103-5>
- Joshi, S., 1999. Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques. *J. Ind. Ecol.* <https://doi.org/10.1162/108819899569449>
- Kalt, G., Wiedenhofer, D., Görg, C., Haberl, H., 2019. Conceptualizing energy services: A review of energy and well-being along the Energy Service Cascade. *Energy Res. Soc. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.02.026>
- Klöpffer, W., 1997. Life Cycle Assessment: From the beginning to the current state. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/BF02986351>
- Kotas, T.J., 1980a. Exergy concepts for thermal plant: First of two papers on exergy techniques in thermal plant analysis. *Top. Catal.* [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(80\)90028-4](https://doi.org/10.1016/0142-727X(80)90028-4)
- Kotas, T.J., 1980b. Exergy criteria of performance for thermal plant: Second of two papers on exergy techniques in thermal plant analysis. *Top. Catal.* [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(80\)90010-7](https://doi.org/10.1016/0142-727X(80)90010-7)
- Kratena, K., 2008. From ecological footprint to ecological rent: An economic indicator for resource constraints. *Ecol. Econ.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.019>
- Lenzen, M., Kanemoto, K., Moran, D., Geschke, A., 2012. Mapping the structure of the world economy. *Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/es300171x>
- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K., Geschke, A., 2013. Building EORA: A global Multi-Region Input-Output database at high country and sector resolution. *Econ. Syst. Res.* <https://doi.org/10.1080/09535314.2013.769938>
- Liu, Z., Geng, Y., Lindner, S., Zhao, H., Fujita, T., Guan, D., 2012. Embodied energy use in China's industrial sectors. *Energy Policy.* <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.016>
- Lozano, M.A., Valero, A., 1993. Theory of the exergetic cost. *Energy.* <https://doi.org/10.1016/0360->

- Mahlia, T.M.I., Taufiq, B.N., Ong, K.P., Saidur, R., 2011. Exergy analysis for day lighting, electric lighting and space cooling systems for a room space in a tropical climate. *Energy Build.*
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.011>
- Mastronardi, L., Mayer, M., 2015. Quita de subsidios a la energia en Argentina: Analisis de bienestar mediante un megc. *Estud. Económicos*.
- Miller, R.E., Blair, P.D., 2009. Input-output analysis: Foundations and extensions, second edition, Input-Output Analysis: Foundations and Extensions, Second Edition.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511626982>
- Ministerio de Desarrollo Productivo, 2018. Balances Energéticos | Argentina.gob.ar [WWW Document]. URL <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia/hidrocarburos/balances-energeticos> (accessed 4.30.20).
- Ministerio de Economía, 1997. Matriz Insumo-Producto de la República Argentina, Matriz Insumo-Producto Argentina. Buenos Aires.
- Ministerio de Energía y Minería, 2017. Escenarios Energéticos 2030, Dirección Nacional de Escenarios y Evaluación de Proyectos. Subsecretaría de Escenarios y Evaluación. Buenos Aires.
- Ministerio de Energía y Minería, 2016. Documento Metodológico del Balance Energético Nacional. Buenos Aires.
- Minx, J.C., Wiedmann, T., Wood, R., Peters, G.P., Lenzen, M., Owen, A., Scott, K., Barrett, J., Hubacek, K., Baiocchi, G., Paul, A., Dawkins, E., Briggs, J., Guan, D., Suh, S., Ackerman, F., 2009. Input-output analysis and carbon footprinting: An overview of applications. *Econ. Syst. Res.*
<https://doi.org/10.1080/09535310903541298>
- Modi, V., McDade, S., Lallement, D., Saghir, J., 2005. Energy Services for the Millennium Development Goals. *Progr. Manag.*
- Moran, M.J., Sciubba, E., 1994. Exergy analysis: Principles and practice. *J. Eng. Gas Turbines Power.*
<https://doi.org/10.1115/1.2906818>
- Morris, D.R., Szargut, J., 1986. Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet earth. *Energy*. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(86\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(86)90013-7)
- Murray-Leach, R., 2019. The World's First Fuel: How energy efficiency is reshaping global energy systems. Energy Efficiency Council, Melbourne.
- Nakamura, S., Nakajima, K., Kondo, Y., Nagasaka, T., 2007. The waste input-output approach to materials flow analysis: Concepts and application to base metals. *J. Ind. Ecol.*
<https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1290>

- Nakićenović, N., Gilli, P.V., Kurz, R., 1996a. Regional and global exergy and energy efficiencies. *Energy*.
[https://doi.org/10.1016/0360-5442\(96\)00001-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(96)00001-1)
- Nakićenović, N., Gilli, P.V., Kurz, R., 1996b. Regional and global exergy and energy efficiencies. *Energy*.
[https://doi.org/10.1016/0360-5442\(96\)00001-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(96)00001-1)
- Nakićenović, N., John, A., 1991. CO2 reduction and removal: Measures for the next century. *Energy*.
[https://doi.org/10.1016/0360-5442\(91\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0360-5442(91)90007-9)
- Odum, H.T., 1973. Energy, ecology, and economics. *Ambio*. <https://doi.org/10.2307/4312030>
- Odyssee-Mure, 2009. Energy Efficiency Trends and Policies in the EU 27. *Energy*.
- Oikonomou, V., Becchis, F., Steg, L., Russolillo, D., 2009. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.035>
- Organización Lationamericana de Energía, 2017. Manual de Balances de Energía Útil. <https://doi.org/ISBN:978-9978-70-123-2>
- Organización Lationamericana de Energía, 2011. Manual de Estadísticas Energéticas. *J. Chem. Inf. Model*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Owen, A., Brockway, P., Brand-Correa, L., Bunse, L., Sakai, M., Barrett, J., 2017. Energy consumption-based accounts: A comparison of results using different energy extension vectors. *Appl. Energy*.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.089>
- Patterson, M.G., 1996. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy* 24, 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Velázquez, D., 2013. Revisiting energy efficiency fundamentals. *Energy Effic*.
<https://doi.org/10.1007/s12053-012-9180-8>
- Presidencia de la Nación, 2019. Decreto 7/2019. Ley de Ministerios. Modificación [WWW Document]. *Bole*.
 URL <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=333138> (accessed 4.30.20).
- Presidencia de la Nación, 2015. Decreto 231/2015. Administración Pública Nacional [WWW Document].
Boletín Of. la República Argentina. URL <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/255000-259999/257246/norma.htm> (accessed 4.30.20).
- Presidencia de la Nación, 2007. Decreto 140/2007. Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía [WWW Document]. *Boletín Of. la República Argentina*. URL
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/135000-139999/136078/norma.htm> (accessed 4.30.20).
- Reistad, G.M., 1975. Available energy conversion and utilization in the United States. *J. Eng. Gas Turbines Power*. <https://doi.org/10.1115/1.3446026>

- Rocco, M. V., Colombo, E., 2016. Evaluating energy embodied in national products through Input-Output analysis: Theoretical definition and practical application of international trades treatment methods. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.026>
- Rocco, M. V., Colombo, E., Sciubba, E., 2014a. Advances in exergy analysis: A novel assessment of the Extended Exergy Accounting method. *Appl. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.080>
- Rocco, M. V., Colombo, E., Sciubba, E., 2014b. Advances in exergy analysis: A novel assessment of the Extended Exergy Accounting method. *Appl. Energy* 113, 1405–1420. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.080>
- Rocco, M. V., Forcada Ferrer, R.J., Colombo, E., 2018. Understanding the energy metabolism of World economies through the joint use of Production- and Consumption-based energy accountings. *Appl. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.090>
- Rosen, M.A., 1992. Evaluation of energy utilization efficiency in Canada using energy and exergy analyses. *Energy*. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(92\)90109-D](https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90109-D)
- Ruggles, R., 1995. System of national accounts, 1993. Commission for the European community-eurostat, International monetary fund, organization for economic co-operation and development, United Nations, and World Bank: Brussels/Luxembourg, New York, Paris, Washington, DC, 1. J. Gov. Inf. [https://doi.org/10.1016/1352-0237\(95\)90103-5](https://doi.org/10.1016/1352-0237(95)90103-5)
- Schipper, L., Unander, F., Murtishaw, S., Ting, M., 2001. Indicators of energy use and carbon emissions: Explaining the energy economy link. *Annu. Rev. Energy Environ.* <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.49>
- Schuschny, A., 2005. Tópicos sobre el Modelo de Insumo-Producto: teoría y aplicaciones. Ser. Estud. estadísticos y Prospect.
- Sciubba, E., 2001. Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems. *Exergy, An Int. J.* [https://doi.org/10.1016/s1164-0235\(01\)00012-7](https://doi.org/10.1016/s1164-0235(01)00012-7)
- Sciubba, E., Susani, L., Tiezzi, E.B.P., 2003. Exergy and extended exergy accounting of the Province of Siena, in: *Advances in Ecological Sciences*.
- Sciubba, E., Wall, G., 2007. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. *Int. J. Thermodyn.* <https://doi.org/10.5541/ijot.1034000184>
- Sensini, P., Fiora, J., Iannelli, L., Gil, S., 2018. ¿Qué significa eficiencia de los artefactos domésticos? Factores de comparación energéticos. Factores de corrección de eficiencia para distintos insumos energéticos en Argentina. *Energías Renov. y Medio Ambient.* 42, 1-13. ISSN0328-932X.
- SGE, 2018. *Aplicativo Nacional de Etiquetado de Viviendas [WWW Document]*. Secr. Gob. Energía. Pres. la

Nación. URL etiquetado viviendas.energia.gob.ar

SGE, 2016. Balances Energéticos Nacionales.

Solomon, S., D., Qin, M., Manning, Z., Chen, M., Marquis, K.B., Averyt, M.T., Miller HL, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., 2007. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. D Qin M Manning Z Chen M Marquis K Averyt M Tignor HL Mill. New York Cambridge Univ. Press pp. <https://doi.org/10.1038/446727a>

Song, G., Xiao, J., Zhao, H., Shen, L., 2012. A unified correlation for estimating specific chemical exergy of solid and liquid fuels. Energy. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.016>

Sorrell, S., 2009. The rebound effect: Definition and estimation, in: International Handbook on the Economics of Energy. <https://doi.org/10.4337/9781849801997.00014>

Sovacool, B.K., 2011. Conceptualizing urban household energy use: Climbing the “Energy Services Ladder.” Energy Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.041>

Stagnitta, R., Abalone, R., Gastón, A., 2017. Modelo analítico para estimar el consumo energético de viviendas en régimen dinámico. Parte 1: Análisis del flujo de energía a través de muros. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient. 21, 08.167-02.178 ISSN 2314-1433.

Stagnitta, R., Gastón, A., Abalone, R., 2018. Modelo analítico para estimar el consumo energético de viviendas en régimen dinámico. Parte 2: Requerimiento de energía para calefacción de una vivienda para un mes específico. Av. en Energías Renov. y Medio Ambient. 22, 01.25-01.36 ISSN 2314-1433.

Stougie, L., Kooi, H.J. Van Der, 2011. The Relation between Exergy and Sustainability According to Literature. 2nd Int. Exergy, Life Cycle Assess. Sustain. Work. Symp.

Suh, S., Huppes, G., 2005. Methods for life cycle inventory of a product. J. Clean. Prod. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2003.04.001>

Szargut, J., 2005. Exergy method: technical and ecological applications. Int. Ser. Dev. heat Transf.

Szargut, J., 1989. Chemical exergies of the elements. Appl. Energy. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(89\)90016-0](https://doi.org/10.1016/0306-2619(89)90016-0)

Tanaka, K., 2008. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. Energy Policy. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.032>

Torres, E.A., Gallo, W.L.R., 1998. Exergetic evaluation of a cogeneration system in a petrochemical complex. Energy Convers. Manag. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(98\)00068-5](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(98)00068-5)

Tronchin, L., Fabbri, K., 2008. Analysis of buildings' energy consumption by means of exergy method. Int. J.

Exergy. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2008.020828>

Tsatsaronis, G., 1993. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Prog. Energy Combust. Sci.* [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90016-8](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90016-8)

United Nations, 1968. *A System of National Accounts*. Department of Economic and Social Affairs. Statistical Office of the United Nations, New York.

United Nations Statistics Division, 2011. *International Recommendations for Energy Statistics - Draft*. New York.

Valero, A., Lozano, M.A., Munoz, M., 1986a. GENERAL THEORY OF EXERGY SAVING 1. ON THE EXERGETIC COST., in: American Society of Mechanical Engineers, Advanced Energy Systems Division (Publication) AES.

Valero, A., Munoz, M., Lozano, M.A., 1986b. GENERAL THEORY OF EXERGY SAVING: II. ON THE THERMOECONOMIC COST., in: American Society of Mechanical Engineers, Advanced Energy Systems Division (Publication) AES.

Valero, A., Munoz, M., Lozano, M.A., 1986c. GENERAL THEORY OF EXERGY SAVING: III. ENERGY SAVING AND THERMOECONOMICS., in: American Society of Mechanical Engineers, Advanced Energy Systems Division (Publication) AES.

Wall, G., 1977. *Exergy: A Useful Concept Within Resource Accounting*. Chalmers Univ. Technol. Univ. Göteborg, Sweden.

Wit, M.H. the, 2009. *Heat, Air and Moisture in Building Envelopes*, Response.

Wood, R., Lenzen, M., Suh, S., Suh, S., 2009. *Handbook of Input–Output Economics in Industrial Ecology*, null.

Woudstra, N., Woudstra, T., Pirone, A., Stelt, T. van der, 2010. Thermodynamic evaluation of combined cycle plants. *Energy Convers. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.016>

Zabaloy, M.F., Recalde, M.Y., Guzowski, C., 2019. Are energy efficiency policies for household context dependent? A comparative study of Brazil, Chile, Colombia and Uruguay. *Energy Res. Soc. Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.015>

Zhang, Y., Zheng, H., Yang, Z., Su, M., Liu, G., Li, Y., 2015. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China. *Energy Policy.* <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.014>

Anexo

Tabla A.1: Datos climáticos ciudad de Rosario.

Mes	Período	T_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{N,i}$	$I_{S,i}$	$I_{E,i}$	$I_{O,i}$	$I_{H,i}$	$I_{sol,i}$
		h	$^{\circ}C$	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
Enero	Refrigeración	744	25,0	58	39	110	110	289	121
Febrero	Refrigeración	672	23,6	81	26	100	100	252	112
Marzo	Refrigeración	360	21,6	116	21	87	86	208	104
Abril	-	0	17,5	138	18	69	69	158	90
Mayo	Calefacción	360	13,8	144	17	56	56	123	79
Junio	Calefacción	720	11,0	132	15	45	45	99	67
Julio	Calefacción	744	10,0	151	17	54	54	120	79
Agosto	Calefacción	744	12,0	147	18	65	65	150	89
Septiembre	Calefacción	360	15,0	124	20	79	78	187	98
Octubre	-	0	18,5	91	23	93	92	233	106
Noviembre	Refrigeración	360	21,5	64	36	112	109	285	121
Diciembre	Refrigeración	744	23,6	48	44	114	115	293	123

Tabla A.2: Datos climáticos ciudad de Mendoza.

Mes	Período	T_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{N,i}$	$I_{S,i}$	$I_{E,i}$	$I_{O,i}$	$I_{H,i}$	$I_{sol,i}$
		h	$^{\circ}C$	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
Enero	Refrigeración	744	26,0	74	32	97	97	250	110
Febrero	Refrigeración	672	24,1	125	22	98	98	241	117
Marzo	Refrigeración	360	21,5	162	19	97	96	226	120
Abril	-	0	16,7	179	17	81	81	182	108
Mayo	Calefacción	360	12,5	175	16	67	66	147	94
Junio	Calefacción	720	9,2	189	15	58	58	124	89
Julio	Calefacción	744	8,6	181	17	67	67	142	95
Agosto	Calefacción	744	11,4	141	18	81	82	178	100
Septiembre	Calefacción	360	14,7	96	18	91	92	210	101
Octubre	-	0	18,9	54	21	104	104	252	107
Noviembre	Refrigeración	360	20,6	40	30	104	102	258	107
Diciembre	Refrigeración	744	23,7	68	38	107	106	265	129

Tabla A.3: Datos climáticos ciudad de San Carlos de Bariloche.

Mes	Período	T_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{N,i}$	$I_{S,i}$	$I_{E,i}$	$I_{O,i}$	$I_{H,i}$	$I_{sol,i}$
		h	$^{\circ}C$	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
Enero	-	0	14,5	86	37	124	126	298	134
Febrero	-	0	14,9	118	25	115	115	268	128
Marzo	Calefacción	744	12,2	144	18	94	91	199	109
Abril	Calefacción	720	8,6	151	15	65	65	134	86
Mayo	Calefacción	744	5,5	130	11	43	42	84	62
Junio	Calefacción	720	3,6	105	9	31	30	58	47
Julio	Calefacción	744	2,7	124	11	38	39	74	57
Agosto	Calefacción	744	2,8	133	12	52	51	103	70
Septiembre	Calefacción	720	5,3	144	16	79	79	167	97
Octubre	Calefacción	744	7,4	119	20	101	100	227	113
Noviembre	Calefacción	720	9,9	90	32	120	118	280	128
Diciembre	-	0	12,4	74	39	125	123	297	132

Tabla A.4: Datos climáticos ciudad de San Miguel de Tucumán.

Mes	Período	T_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{N,i}$	$I_{S,i}$	$I_{E,i}$	$I_{O,i}$	$I_{H,i}$	$I_{sol,i}$
		h	$^{\circ}C$	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
Enero	Refrigeración	744	24,6	28	33	94	92	243	98
Febrero	Refrigeración	672	23,6	50	21	89	89	224	95
Marzo	Refrigeración	744	22,5	97	17	87	88	215	101
Abril	-	0	19,0	135	16	76	76	179	96
Mayo	-	0	18,6	152	15	64	64	146	88
Junio	Calefacción	720	13,2	159	14	60	60	132	85
Julio	Calefacción	744	12,2	174	16	66	69	155	96
Agosto	Calefacción	744	15,2	165	17	82	82	191	107
Septiembre	-	0	18,6	122	18	92	92	221	109
Octubre	-	0	21,7	69	20	95	95	238	103
Noviembre	Refrigeración	720	23,2	33	30	92	90	235	96
Diciembre	Refrigeración	744	26,0	23	40	91	91	239	97

Tabla A.5: Datos climáticos ciudad de Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Mes	Período	T_i	$\theta_{ext,i}$	$I_{N,i}$	$I_{S,i}$	$I_{E,i}$	$I_{O,i}$	$I_{H,i}$	$I_{sol,i}$
		h	$^{\circ}C$	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2
Enero	Refrigeración	744	24,7	55	35	111	113	274	118
Febrero	Refrigeración	672	23,8	80	22	98	98	238	107
Marzo	Refrigeración	360	22,0	114	16	83	83	193	98

Abril	-	0	18,7	131	13	64	63	140	82
Mayo	Calefacción	360	15,3	135	12	49	48	105	70
Junio	Calefacción	720	11,9	129	11	43	40	87	62
Julio	Calefacción	744	11,3	130	11	45	45	93	65
Agosto	Calefacción	744	12,3	148	14	64	64	139	86
Septiembre	Calefacción	360	15,2	117	14	73	72	166	88
Octubre	-	0	17,7	86	18	88	87	210	98
Noviembre	Refrigeración	360	21,3	60	29	101	103	258	110
Diciembre	Refrigeración	744	23,8	48	38	104	109	276	115

Tabla A.6: Características térmicas específicas de las viviendas promedio en las localidades analizadas.

Símbolo	Unidad	Rosario	Mendoza	Bariloche	Tucumán	Buenos Aires
S/A	m ² /m ²	3,88	3,85	4,01	3,87	3,98
b	-	0,56	0,55	0,61	0,52	0,52
U	W/m ² K	1,90	2,08	1,05	1,84	1,86
U _w	W/m ² K	4,74	4,86	4,00	5,04	4,11
e	-	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05
α	-	0,65	0,73	0,61	0,75	0,69
τ	-	0,81	0,80	0,75	0,81	0,78
H _{inf,c}	W/m ² K	0,42	0,35	0,24	0,34	0,38
H _{inf,r}	W/m ² K	3,35	2,81	1,79	2,32	3,52
τ _c	h	21,33	14,57	16,30	15,46	18,34
τ _r	h	12,42	9,99	9,26	9,44	9,95

Tabla A.7: Características térmicas específicas de la vivienda adoptada como promedio nacional (Rosario) según distintos escenarios de mejora.

Símbolo	Unidad	Escenarios 0 y 1	Escenarios 2 and 3
S/A	m ² /m ²	3,91	3,91
b	-	0,54	0,54
U	W/m ² K	1,87	0,53
U _w	W/m ² K	4,62	4,62
e	-	0,05	0,05
α	-	0,69	0,69
τ	-	0,78	0,78
H _{inf,h}	W/m ² K	0,37	0,37
H _{inf,c}	W/m ² K	3,21	3,21
τ _h	h	18,02	37,23
τ _c	h	10,15	14,31

Tabla A.8: Balance Energético de la República Argentina (International Energy Agency, 2016)

BEN 2016. Argentina. IEA	Coal*	Crude oil	Oil products	Natural gas	Nuclear	Hydro	Geothermal, solar, etc.	Biofuels and waste	Electricity	Heat	Total**
	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep
Production	14	29546	0	35963	2159	3207	49	4826	0	0	75764
Imports	819	790	6476	8740	0	0	0	0	847	0	17673
Exports	-36	-2332	-1542	-51	0	0	0	-1448	-28	0	-5436
International marine bunkers***	0	0	-691	0	0	0	0	0	0	0	-691
International aviation bunkers****	0	0	-973	0	0	0	0	0	0	0	-973
Stock changes	27	64	-174	0	0	0	0	0	0	0	-83
TPES	823	28068	3097	44652	2159	3207	49	3379	819	0	86252
Transfers	0	927	-354	0	0	0	0	0	0	0	573
Statistical differences	28	784	29	-487	0	0	0	10	0	0	365
Electricity plants	-643	0	-4886	-15579	-2159	-3207	-49	-576	12616	0	-14482
CHP plants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heat plants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gas works	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oil refineries	0	-30329	29703	0	0	0	0	0	0	0	-626
Coal transformation	12	0	-557	0	0	0	0	0	0	0	-546
Liquefaction plants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other transformation	0	640	0	0	0	0	0	-144	0	0	496
Energy industry own use	0	-90	-1409	-6235	0	0	0	0	-333	0	-8067
Losses	0	0	0	-213	0	0	0	0	-1757	0	-1970
TFC	220	0	25623	22138	0	0	0	2669	11346	0	61996
Industry	220	0	3986	6936	0	0	0	883	4424	0	16449
Transport	0	0	12794	3406	0	0	0	1258	47	0	17505
Other	0	0	5512	10231	0	0	0	528	6875	0	23146
Residential	0	0	1381	9080	0	0	0	264	3851	0	14576
Commercial and public services	0	0	370	1151	0	0	0	162	2944	0	4628
Agriculture / forestry	0	0	3761	0	0	0	0	101	79	0	3942
Fishing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-specified	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-energy use	0	0	3331	1564	0	0	0	0	0	0	4896
<i>Chemical / Petrochemical</i>	0	0	2368	1564	0	0	0	0	0	0	3933

Tabla A.9: Productos del modelo IO (SUTs Argentina 2015).

Índice	Producto	Índice	Producto (cont.)
1	Cereals	41	Preparations used for animal feed
2	Vegetables and legumes	42	Bakery Products
3	Fruits and nuts	43	Sugar
4	Oil seeds and oleaginous fruits	44	Cocoa, chocolate and sugar confectionery
5	Live plants, flowers and flower buds, seeds of flowers and fruits, vegetable seeds	45	Macaroni, noodles, couscous and similar farinaceous products
6	Plant crops and spices beverages	46	Foodstuffs nec
7	Snuff unprocessed	47	Alcoholic beverages nec
8	Plants used for sugar manufacturing	48	Wines
9	Raw vegetable materials nec	49	Beer and malt
10	Live animals	50	Soft drinks, bottled mineral water
11	Other animal products	51	Snuff products
12	Raw wood	52	Natural textile fibers ready for spinning
13	Natural gums	53	Textile staple fibers, processed for spinning
14	Other forestry products (includes charcoal)	54	Yarns and threads for textile fibers
15	Fish live, fresh or chilled	55	Fabrics
16	Not frozen crustaceans, oysters, other invertebrates, live, fresh or chilled	56	Made-up textile articles
17	Other aquatic products	57	Clothing, except fur
18	Coal and lignite, peat	58	Furskins, tanned or dressed, and artificial skins, articles made with these skins (except headgear)
19	Crude oil and natural gas	59	Hardened or pickled leather, synthetic or composition leather
20	Ores and concentrates of uranium and thorium	60	Luggage, handbags and similar articles, articles of saddlery, leather goods
21	Iron ores and concentrates, other than roasted iron pyrites	61	Footwear
22	Ores and concentrates of nonferrous metals (except ores and concentrates of uranium or thorium)	62	Parts of footwear, insoles, heel cushions and similar articles, gaiters, leggings and similar articles and parts thereof
23	Building or carving stone	63	Wood sawn or chipped lengthwise
24	Gypsum; anhydrite, limestone flux, limestone and other calcareous stone, of a kind used for the manufacture of lime or cement	64	Wood continuously shaped along any its edges or faces, wood wool, wood flour, wood chips or particles
25	Arenas, sands, gravel, broken or crushed stone, natural bitumen and asphalt	65	Wood products
26	Clays	66	Pulp, paper and paperboard
27	Chemical and fertilizer minerals	67	Books, brochures, leaflets (except advertising material) printed, printed maps, printed or handwritten sheet music
28	Salt and pure sodium chloride, sea water	68	Newspapers, magazines and periodicals
29	Precious and semiprecious stones, pumice stone, emery, natural abrasives, other minerals	69	Postage stamps, checkbooks, bank notes, promotional materials, prints and other printed
30	Electricity, but distribution service	70	Record books, account books, booklets, notes, letter pads and other stationery, paper or cardboard, types of printing plates or cylinders ready for printing or other printing components
31	Coal gas, water gas, producer gas and other similar gases, other than petroleum gases and other gaseous hydrocarbons	71	Gasoline, gas oil, fuel oil and other fuels, other refined petroleum products and preparations nec
32	Meat and meat products	72	Petroleum gases and other gaseous hydrocarbons, except natural gas
33	Prepared or preserved fish	73	Vaseline, wax and similar products, waste oil or oils obtained from bituminous minerals, nuclear fuel
34	Vegetables prepared or preserved	74	Basic organic chemicals, basic inorganic chemicals nec, chemical products nec
35	Fruit and vegetable juices	75	Dyeing and tanning extracts, tannins and their derivatives nec dyestuffs
36	Fruits and nuts, prepared or preserved	76	Fertilizers and pesticides
37	Oils and animal fats and vegetable	77	Plastics in primary forms
38	Cotton linters, oilseed cake, flours of seeds or oleaginous fruits, vegetable waxes	78	Synthetic rubber, artificial mixtures and similar natural gums
39	Dairy Products	79	Paints and varnishes and related products, colors for painting, ink
40	Milling products, starches and starch products, sugars and sugar syrups nec	80	Pharmaceuticals

Índice	Producto (cont.)	Índice	Producto (cont.)
81	Soap, cleaning preparations, perfumes and toilet preparations	121	Arms and ammunition and parts thereof
82	Made textile fibers	122	Household appliances and parts thereof
83	Tyres and inner tubes, rubber	123	Other special purpose machinery and parts thereof
84	Other rubber products	124	Office machines, accounting and related parts and accessories
85	Semi-manufactures of plastics	125	Used computers and parts and accessories
86	Articles for the packing of goods, of plastics	126	Motors, generators and transformers and their parts and pieces
87	Other plastic products	127	Electrical control devices and distribution of electricity and parts thereof
88	Glass and glass products	128	Insulated wire and cable, optical fiber cables
89	Non-structural ceramic ware	129	Accumulators and primary batteries and parts thereof
90	Refractory products and structural non-refractory clay	130	Incandescent electric lamps or discharge, arc lamps, electric lighting equipment, and parts and pieces
91	Cement, lime and plaster	131	Other electrical equipment and parts thereof
92	Articles of concrete, cement and plaster	132	Electronic valves and tubes, electronic components and parts and pieces
93	Carving or building stone and related products	133	Television transmission apparatus and apparatus for broadcasting and telephony and line telegraphy; their parts and accessories
94	Other non-metallic mineral products nec	134	Radio receivers and television receivers, apparatus for recording or reproduction of sound or television signals, microphones, speakers, amplifiers, etc., Apparatus or radio-telephony receivers
95	Furniture and car seats	135	Parts for two-way radio broadcasting, radar for navigation devices or remote control by radio waves
96	Jewellery and related articles, musical instruments, sports goods, games and toys	136	Magnetic tapes and disks for audio or audiovisual equipment. Cards with magnetic strips or chips
97	Prefabricated Buildings	137	Medical and surgical equipment and orthopedic appliances
98	Other manufactured nec	138	Instruments and measuring devices, verification, testing, navigating and other purposes, except optical instruments, process control instruments and industrial parts and accessories
99	Residues from the food industry and snuff	139	Optical instruments and photographic equipment and apparatus, and parts and accessories
100	Non-metal waste or scrap	140	Watches and parts thereof
101	Waste and scrap metal	141	Motor vehicles, trailers and parts, parts and accessories
102	Iron and steel joint	142	Bodies (including cabs) for motor vehicles, trailers, parts and accessories
103	Rolled, stretched or bent iron or steel	143	Ships. Sports and recreation boats
104	Common precious metals and metals clad with precious metal, copper, nickel, aluminum, alumina, lead, zinc and tin, raw, semi-finished products or their alloys, other nonferrous metals and articles thereof	144	Locomotives and rolling stock of railway and tramway and parts thereof
105	Structural metal products and parts	145	Aircraft and spacecraft and parts thereof
106	Tanks, reservoirs and containers of iron, steel or aluminum	146	Other transport equipment and parts thereof
107	Steam generators, water (except hot water boilers for central heating) and parts thereof	147	Nonfinancial intangible assets
108	Other fabricated metal products	148	Building and construction services
109	Engines and turbines and parts thereof	149	Wholesale trade services
110	Pumps, compressors, engines, water power and pneumatic power engines and valves and parts thereof	150	Retail trade services
111	Bearings, gears, gear and transmission components and parts thereof	151	Hosting Services
112	Ovens and burners to power homes and parts thereof	152	Food supply services, services of beverages for consumption on the premises
113	Lifting and handling equipment and parts thereof	153	Passenger transport services
114	Other general purpose machinery and parts thereof	154	Freight services
115	Agricultural and forestry machinery and parts thereof	155	Pipeline transport services
116	Machine tools and parts and accessories	156	Transport and auxiliary services
117	Machinery for metallurgy and parts thereof	157	Postal and courier services
118	Machinery for mining, quarrying and construction, and parts thereof	158	Transmission and distribution services
119	Machinery for food, beverages and snuff and parts thereof	159	Gas distribution services through mains
120	Machinery for the manufacture of textiles, clothing and leather goods and parts thereof	160	Water distribution pipes

Índice	Producto (cont.)	Índice	Producto (cont.)
161	Financial intermediation	179	Maintenance and repair services
162	Insurance and Pensions	180	Administrative services of government and community services in general
163	Reinsurance services	181	Administrative services for the regime of compulsory social security
164	Auxiliary services to financial intermediation	182	Education Services
165	Auxiliary services to insurance and pensions.	183	Human health services
166	Services related to real estate owned or leased	184	Veterinary services
167	Real estate services on a fee or contract basis	185	Social Services
168	Leasing with or without option to purchase machinery and equipment without operator	186	Sewage, refuse disposal services
169	Leasing with or without option to purchase other items	187	Services furnished by business, employers and professional
170	Research and development services	188	Services furnished by trade unions
171	Professional, scientific, and technical and excludes advertising services	189	Services provided by other associations
172	Advertising	190	Recreational, cultural and sporting
173	Telecommunication services	191	Laundry, cleaning and dyeing
174	Online access services, provision of access services online, news agency services, library services and archives	192	Beauty treatment services and wellness services
175	Services agencies and personnel supply services, research services and safety cleaning services, packaging services, other support services	193	Funeral, cremation and burial
176	Production services through commission agents and contractors basic manufactures, services installation (except construction)	194	Other miscellaneous services
177	Services related to agriculture, hunting, forestry and fishing	195	Domestic Services
178	Mining-related services and services related to the supply of electricity, gas and water	196	Reexport

Tabla A.10: Sectores del modelo IO (SUTs Argentina 2015).

Índice	Sector	Índice	Sector (cont.)
1	Cereals, oilseeds and forage	51	Plastic raw materials and synthetic rubber
2	Growing of vegetables, legumes, flowers and ornamental plants	52	Paints and varnishes
3	Growing fruits and nuts	53	Medicinal products
4	Industrial crops	54	Soaps, detergents and cosmetics
5	Seed production	55	Other chemicals
6	Livestock and milk production, wool and hair	56	Manufactured fibers
7	Farm Production	57	Tires, inner tubes and retreading of casings
8	Agricultural services	58	Rubber Products
9	Hunting	59	Plastic Products
10	Forestry and logging	60	Glass and glass products
11	Fishing	61	Ceramic refractory products and non-refractory non-structural
12	Extraction of petroleum, gas, coal and uranium	62	Non-refractory clay and ceramic products for structural use
13	Mining of metal ores	63	Cement, lime and plaster
14	Other mining	64	Articles of concrete, cement and plaster
15	Killing of animals, conservation and meat processing	65	Manufacture of basic iron and steel
16	Processing and preserving of fish and fish products	66	Nonferrous metallurgy
17	Processing and preserving of fruits and vegetables	67	Metal Casting
18	Oils and oilseeds products	68	Metal structures, tanks, reservoirs and steam generators
19	Dairy Products	69	Forging, rolling and metal processing
20	Grinding wheat and other cereals	70	Cutlery and hardware and hand tools
21	Feed	71	Other metal products
22	Bakery Products	72	Engines, turbines, pumps and compressors
23	Sugar	73	Gears, ovens, elevators and other general purpose machinery
24	Cocoa, chocolate and sugar confectionery	74	Tractors and agricultural machinery
25	Pasta	75	Other special purpose machinery
26	Other food products	76	Household appliances
27	Alcoholic beverages	77	Office machinery and computers
28	Wine production	78	Motors, generators and transformers
29	Beer and malt	79	Testing equipment and power distribution
30	Soft drinks, mineral water and other nonalcoholic drinks	80	Insulated wire and cable
31	Snuff products	81	Accumulators and batteries
32	Fibers, yarns and weaving of textiles	82	Electric lamps and lighting equipment
33	Finishing of textiles	83	Tubes and radio transmitters, TV and telephony
34	Manufacture of textiles	84	Radio and TV Receivers
35	Knitted	85	Medical, precision and optical clocks
36	Clothing, finishing and dyeing of fur	86	Motor vehicles
37	Leather tanning and finishing	87	Bodies and trailers
38	Leather goods and leather	88	Auto Parts
39	Footwear and parts	89	Ships, locomotives and aircraft
40	Sawmills	90	Motorcycles, bicycles and other transport
41	Wood and wood products	91	Furniture and mattresses
42	Pulp and paper	92	Other manufacturing industries
43	Corrugated paper and paperboard and containers of paper and paperboard	93	Electricity
44	Paper and paperboard products	94	Gas
45	Publishing of books, pamphlets, recordings and other issues	95	Water
46	Publishing of newspapers and magazines	96	Construction
47	Printing and reproduction of recorded media	97	Wholesale
48	Oil Refining	98	Retail Trade
49	Basic Chemicals	99	Hotels
50	Fertilizers and pesticides	100	Restaurants

Índice	Sector (cont.)	Índice	Sector (cont.)
101	Passenger transportation	114	Public education
102	Land freight transport	115	Private Education
103	Pipeline Transport	116	Public human health
104	Shipping	117	Private human health
105	Air transport	118	Veterinary services
106	Transport activities	119	Social Services
107	Post service	120	Sanitation
108	Telecommunications	121	Partnerships Activity
109	Financial Institutions	122	Cinema services, radio and television
110	Insurance	123	Personal services, repair, sports and leisure activities
111	Business services and professional	124	Housekeeping
112	Real estate	125	Reexport
113	Public administration and defense and social security schemes of compulsory		

Tabla A.11: Análisis de sensibilidad de la relación entre unidades de prestación definidas y de referencia ($UP_{obj}/UP_{obj,0}$) respecto de variaciones en los parámetros de definición del prototipo de vivienda de prueba.

Símbolo	Unidad	Valor	Calefacción [%]				Refrigeración [%]		
			Mendoza	Bariloche	Tucumán	Buenos Aires	Mendoza	Tucumán	Buenos Aires
A	m ²	80,00	-0,43	-0,23	-1,11	-0,45	1,18	0,69	1,18
		64,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		48,00	-0,11	0,14	0,19	-0,85	1,68	0,00	1,68
		10,00	0,17	0,27	-0,65	-0,04	1,42	0,48	1,42
e. S	m ²	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		6,00	0,00	0,70	0,00	0,00	2,42	-0,41	2,42
		2,65	0,24	1,92	-0,85	0,21	0,49	0,72	0,49
U	W/m ² K	2,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		1,59	0,96	7,12	2,96	-0,38	0,84	-0,98	3,86
		6,13	-0,36	0,45	-0,42	-0,15	0,00	0,00	2,53
U _w	W/m ² K	4,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		3,68	-0,48	-0,33	-1,19	-0,82	0,31	-0,36	0,31
		0,75	0,22	-0,10	0,26	-0,70	1,51	-0,04	1,51
α	-	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,45	-0,14	0,35	-1,04	-0,10	-0,88	-0,91	0,44
b	-	0,86	-0,36	1,82	-1,45	-0,15	2,11	0,00	2,11
		0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,52	0,22	-2,83	4,71	-0,70	4,04	-0,25	4,04